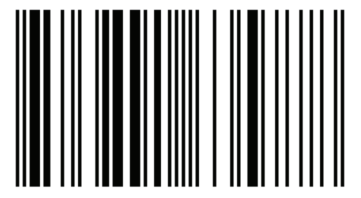
Modélisation de la croissance chez l'olivier TOME 2. Consommation en eau

Chiraz Masmoudi Charfi
Institut de l'Olivier Tunisie

Modélisation de la Croissance chez l'Olivier. Tome 2

Résumé-Le développement aérien et radiculaire de jeunes oliviers irrigués ‘Chétoui, Meski, Manzanille et Picholine’ a été suivi pendant les six premières années de culture en vue d’élaborer un modèle de détermination des besoins en eau du jeune olivier en considérant l’arbre en tant qu’unité intégrée dans le système sol-plante-climat. Pour ce faire, l'approche hydrologique a été utilisée en considérant différents compartiments du sol, alors que l'approche physiologique a permis de déterminer la transpiration de l'olivier à partir des mesures du flux de la sève brute (Granier, 1987). Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus par la méthode climatique (FAO, 1998). Les résultats ont montré que l’état hydrique du sol varie considérablement sous la frondaison au cours de la saison d’irrigation en fonction de la distance au tronc. La transpiration maximale ne représente que 20% de la demande climatique. Un modèle de calcul des besoins en eau de l’olivier a été développé, basé sur la méthode de la FAO (1998) pour les conditions non-standard, mais ajusté aux jeunes arbres en rapportant les différents paramètres du modèle à la surface du sol exploitée par les racines.

Née en 1965 à Tunis (Tunisie). Maitre de Conférences à l’Institut de l’Olivier. Ingénieur Agronome Spécialisé en Horticulture (INAT, 1992), Docteur d’Etat depuis 1998, DEA en Physiologie Végétale (FST, 1997). Prix de l’Association Tunisienne des Sci. Horticoles (1992). Spécialiste en Oléiculture. 30 articles publiés et trois Chapitres d’ouvrages.



978-3-8416-3577-8



Charfi Masmoudi



Chiraz Charfi Masmoudi

Modélisation de la Croissance chez l'Olivier. Tome 2

Consommation en eau



Chiraz Charfi Masmoudi

Modélisation de la Croissance chez l'Olivier. Tome 2

Chiraz Charfi Masmoudi

Modélisation de la Croissance chez l'Olivier. Tome 2

Consommation en eau

Presses Académiques Francophones

Impressum / Mentions légales
Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Information bibliographique publiée par la Deutsche Nationalbibliothek: La Deutsche Nationalbibliothek inscrit cette publication à la Deutsche Nationalbibliografie; des données bibliographiques détaillées sont disponibles sur internet à l'adresse http://dnb.d-nb.de.

Coverbild / Photo de couverture: www.ingimage.com

Verlag / Editeur:
Presses Académiques Francophones
ist ein Imprint der / est une marque déposée de
OmniScriptum GmbH & Co. KG
Bahnhofstraße 28, 66111 Saarbrücken, Deutschland / Allemagne
Email: info@presses-academiques.com

Herstellung: siehe letzte Seite /
Impression: voir la dernière page
ISBN: 978-3-8416-3577-8

Zugl. / Agréé par: Tunis, Institut National Agronomique de Tunisie, Université de Carthage, 1998

TABLE DES MATIERES

Résumé

Le développement de jeunes oliviers a été suivi pendant les six premières années de culture dans le but d'élaborer un modèle de croissance type en relation avec son alimentation hydrique. L'expérimentation a été menée au Nord de la Tunisie sur quatre variétés commerciales : Chétoui, Meski, Manzanille et Picholine. Cette caractérisation a été abordée en considérant l'arbre en tant qu'unité intégrée dans le système sol-plante-climat en vue de déterminer sa consommation en eau en rapport avec la demande climatique et le développement du système radiculaire. Pour ce faire, l'approche hydrologique a été utilisée en considérant différents compartiments du sol, alors que l'approche physiologique a permis de déterminer la transpiration de l'olivier à partir des mesures du flux de la sève brute (méthode de Granier, 1987). Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus par la méthode climatique de la FAO (1998). Les résultats ont montré que l'état hydrique du sol varie considérablement sous la frondaison au cours de la saison d'irrigation, en fonction de la distance au tronc. La transpiration maximale ne représente que 20% de la demande climatique. A partir de ces résultats, un modèle de calcul des besoins en eau de l'olivier (ETc) a été développé, basé sur la méthode de la FAO (1998) pour les conditions non-standard. Il a été ajusté en rapportant les différents paramètres du modèle à la surface du sol exploitée par les racines.

Mots clefs : Jeune olivier – Variétés – Croissance – Evapotranspiration – Consommation de l'eau – Mesure du flux de la sève brute.

Abstract

Growth of young olive trees was monitored during the first six years of cultivation in order to set a typical model of growth in relation to water consumption. Experiment was carried out in northern Tunisia on four commercial varieties: Chétoui, Meski, Manzanille and Picholine. Growth measurements of tree height, canopy and trunk diameters and shoot elongation were performed on 12 olive trees/variety during the 6 campaigns. Growth dynamic characterization has been achieved considering the young tree as an integrated unit within the soil-plant-climate system in order to determine the olive tree water consumption in relation to the climatic demand and the development of roots. For this purpose, the hydrological approach was used considering different soil compartments. The physiological approach allows determination of the olive tree transpiration obtained from sap flow measurements (Granier method, 1987). Results were compared to those determined by the FAO-climatic method (1998). Results showed high variations of the soil water status under canopy during the irrigation season following the distance to trunk. Maximum transpiration represents 20% of the climatic demand. Using these results, a generalized model for computing water requirements of young olive trees was therefore developed on the basis of the FAO (Allen, 1998) method for non-standard conditions. The model was adapted to young trees by computing extension of the root area.

Key words: Young olive tree – Variety – Growth – Evapotranspiration – Water consumption – sap flow measurement.

INTRODUCTION

L'olivier est une espèce rustique, présente essentiellement autour du bassin Méditerranéen (C.O.I., 1997). Actuellement on compte plus de 900 millions de pieds, plantés sur 10,6 millions d'ha. La Tunisie compte près de 70 millions d'arbres, cultivés sur 1,7 million d'ha. Plus de 90% des plantations sont conduites sous le régime pluvial et ne bénéficient de l'irrigation que pendant les années de sécheresse. Les superficies irriguées couvrent actuellement 80000 ha dont 79% sont destinés à la production d'huile d'olive (O.N.H., 2006).

Au niveau des plantations du Nord et dans une moindre mesure au Centre du pays, différentes combinaisons de variétés et de densités de plantation sont utilisées. Elles sont choisies en fonction des potentialités hydriques de la région et du mode de conduite (intensive, semi intensive ou extensive). Des écartements de plus en plus serrés sont adoptés au Nord (7mx7m, 6mx6m) en vue d'augmenter la productivité des oliveraies (Masmoudi-Charfi et al., 2006). Inversement, des écartements importants sont considérés au Centre et au Sud du pays (10mx10m à 24mx24m), permettant l'exploration d'un plus grand volume de sol qui atteint 576m^3 par olivier dans les plantations traditionnelles de la région de Sfax (O.N.H., 2006).

Parmi les variétés adoptées, les cultivars autochtones Meski (olivier de table) et Chétoui (olivier à double fins) constituent le fond des plantations du Nord (Trigui et Msallem, 2002), qui sont caractérisées par de faibles rendements (0,8 tonne/ha en pluvial et de 3,0 tonnes/ha en irrigué), malgré l'association d'autres cultivars, notamment la Besbessi, la Picholine française et la Manzanille espagnole.

Mais le mélange variétal et le choix de densités plus élevées ne suffisent pas à eux seuls pour obtenir des rendements élevés et stables. L'adoption d'un paquet technique approprié (Institut de l'Olivier, 1994 ; Masmoudi-Charfi et al., 2006) pour chaque mode de conduite dès l'installation de la plantation (taille de formation, irrigation,

fertilisation…etc.) est nécessaire pour gérer rationnellement l'olivette, ce qui requiert la connaissance des principaux aspects relatifs au développement de la plante et à son bon fonctionnement compte tenu des conditions environnementales et ce dans le but de maintenir l'équilibre entre les activités végétatives et fructifères. Une attention particulière est à attribuer au développement de l'arbre pendant les premières années de culture, étant donné que le potentiel de production et la durée de la période productive sont intimement liés au développement de l'arbre pendant la période de jeunesse et à son vécu depuis sa multiplication en pépinière jusqu'à son entrée en production (Lavee, 1997 ; Msallem, 2002).

Les facteurs climatiques, en particulier la température et le rayonnement solaire sont déterminant dans l'élaboration des productions (Bonji et Palliotti, 1994 ; Green, 1993 ; Mariscal et al., 2000 ; Stanley et al., 2000). Ils affectent le niveau de transpiration, la photosynthèse et les processus de développement de l'olive (Moreno et al., 1996 ; Moriana et al., 2002). L'induction florale, qui est la première manifestation de l'organogenèse, dépend en premier de la quantité de lumière interceptée par la canopée (Demarez et al., 2000). Le développement de celle-ci est lui-même lié à la disponibilité de la lumière, en particulier dans les vergers cultivés à haute densité (Piedra et al., 1997).

Cependant, l'eau demeure au Sud de la Méditerranée le facteur le plus limitant pour le développement de l'olivier et l'élaboration du rendement du fait que la majeure partie du cycle productif se produit pendant une période de déficit climatique et que chaque stade phénologique peut être soumis à la contrainte hydrique, dont les conséquences peuvent être contournées ou limitées par l'irrigation (Sole-riera, 1990 ; Sanchez-Raya, 1990 ; Dettori et Russo, 1993 ; Paster et al., 1998 ; Xiloyannis et al., 1999 ; Nogues et Baker, 2000 ; Masmoudi-Charfi et al., 2004 ; Masmoudi-Charfi et al., 2006). Les recherches effectuées sur l'irrigation ont montré que l'apport de l'eau à la fin de l'hiver au cours de la phase de différenciation des bourgeons floraux favorise la formation de fleurs parfaites, stimule la croissance des pousses au printemps et augmente le nombre potentiel de sites de

fructification et de production (Samish et Spiegel, 1966 ; Le Bourdeklles, 1977, 1982 et 1984 ; Loussert et Brousse, 1978 ; Rallo, 1998 ; Rallo et Rapoport, 2001). Certains auteurs rapportent que l'irrigation en période de croissance printanière atténue l'alternance de la production (Ben Mechlia et Hamrouni, 1978 ; Poli, 1979), active la photosynthèse et stimule la production des assimilats en quantité importante qui assurerait la nouaison et le développement d'un grand nombre de fruits (Fernandes Serrano and Vincent Abela, 1982 ; Tombesi, 1993 ; Flore et Layne, 1999 ; Nuberg and Yunusa, 2003 ; Moriana et al., 2003 et 2006. Lorsque l'apport de l'eau se poursuit pendant la période estivale, une croissance des pousses peut être observée alors que la croissance des olives peut se poursuivre même pendant la phase de durcissement de l'endocarpe (Connor et Fereres, 2005). En automne, la croissance des rameaux est tributaire des apports hydriques et de la température. Elle a été observée chez certains cultivars notamment la Picholine marocaine après les premières pluies de la saison (Boulouha, 1986) ; elle engendre un accroissement plus faible que celui du printemps en raison de la présence compétitive des fruits qui sont à ce stade le siège d'une activité de synthèse et d'accumulation des lipides. L'apport de l'eau pendant la période de nouaison - véraison -au cours de laquelle se produisent simultanément le développement des olives, des pousses et du système radiculaire et l'induction des nouveaux bourgeons à fleurs- permet de compenser les pertes d'eau par transpiration, qui peuvent atteindre 70 litres / jour et même les dépasser au cours des journées de forte demande climatique (Abid-Karray, 2006). Mais la réponse à l'eau de l'olivier (consommation) dépend de plusieurs paramètres notamment la variété et son adaptation, la charge en olives, l'état physiologique et hydrique de l'arbre, la réserve hydrique du sol, la demande climatique et la quantité d'eau délivrée (Michelakis, 1986, 1990, 1995 et 2000 ; Michelakis et Vougioucalou, 1988 ; Cruz-Conde Suarez de Tangil et Fuentes-Cabanas, 1989 ; Fernandez et al., 1990 et 1991 ; Clothier et Green, 1994 ; Inglease et al., 1996 ; Dichio et al., 2002 ; Bandino et Dettorio, 2003).

La détermination des besoins en eau de la culture de l'olivier et de sa consommation revêt un intérêt particulier en culture intensive. Ces aspects ont été abordés depuis quelques décennies en vue de la détermination des besoins réels en eau de l'olivier que ce soit à l'échelle de l'année ou durant les différents stades phénologiques, à titre individuel (lysimétrie) (Deidda et al., 1990) ou pour l'ensemble du verger (bilan climatique ou hydrique) (FAO, 1976 ; Riou, 1978 ; Dettori, 1987 ; Habaieb et Masmoudi-Charfi, 2003 ; Palomo et al., 2002 ; Testi et al., 2004). Cependant, et en raison de la complexité du système de culture on se confronte toujours au choix de la méthode de calcul ou de mesure (Allen et al., 1998 ; Rana et Katerji, 2000) surtout pendant les premières années de culture en raison du faible taux de couverture du sol par la biomasse végétale. S'agissant d'une culture arboricole qui couvre partiellement le sol, l'évapotranspiration de la culture (ETc) ne représente pas la quantité d'eau réellement absorbée par l'arbre (Villagra et al., 1995 ; Allen et al., 1998 ; Villalobos et al., 2000). Les parts attribuées à la transpiration de l'arbre (T) et à l'évaporation directe du sol (E) (Bonachela et al., 1999) ne sont pas clairement définies (Masmoudi et al., 2004). De même, ces deux composantes peuvent subir des variations à des intervalles de temps très courts. En effet, du fait que l'état hydrique du sol varie au sein de l'olivette en raison de la distribution hétérogène des racines d'une part (Palease et al., 2000) et du rayonnement solaire d'autre part, il est difficile de caractériser son état comme il est possible de le faire pour des cultures annuelles homogènes et cultivées dans les conditions standards. Les mesures pratiquées au niveau de la rhizosphère à l'aide de tensiomètres, de sondes neutroniques ou d'autres méthodes de mesure, tel que la variation du diamètre du tronc, pris comme indicateur de l'état hydrique de la plante (Goldhamer et Fereres, 2001), ne donnent pas une estimation représentative des disponibilités en eau dans le sol pour l'ensemble du verger ni même pour toute la zone des racines chez un même arbre. Fernandez et al., (2003) ont montré que les parties radiculaires non humectées lors de l'irrigation émettent des signaux de stress alors que les besoins en eau de la culture sont correctement couverts.

Le recours à des méthodes plus fines d'estimation de la consommation en eau telle que la mesure du flux de la sève brute (Nasr, 1987 ; Cruiziat et Tyree, 1990 ; Lousteau et al., 1990 ; Granier, 1987 ; Cabibel, 1991 ; Cabibel et Do, 1991a et b ; Swanson, 1994 ; Smith, 1996 ; Koster et al., 1998 ; Giorio et D'Andria, 2002 ; Fernandez et al., 2001 ; Do et Rocheteau 2003) permet de contourner les problèmes liés à l'hétérogénéité du sol. Cependant, d'autres problèmes apparaissent liés à l'échantillonnage, à l'appareillage et à l'hétérogénéité du système de conduction de la sève, très complexe chez l'olivier et à l'origine de variations importantes au sein de l'arbre et entre les arbres (Abid-Karray, 2006).

La combinaison de différentes méthodes d'estimation de la consommation en eau chez l'olivier, en l'occurrence celle du bilan hydrique (Cohen, 1991 ; Kaspari et al., 1993 ; Abid-Karray, 2006), la méthode climatique et la mesure du flux de la sève brute sur des arbres représentatifs du verger peut aboutir à une détermination correcte de ces besoins à l'échelle annuelle ou des différents stades phénologiques (Sanz-Cortes et al., 2002). L'analyse bibliographique a montré que peu d'études sont consacrées à l'olivier par rapport à d'autres cultures arboricoles que ce soit pour la caractérisation de sa croissance ou pour la détermination de sa consommation en eau en raison de la complexité de la réponse de l'espèce qui diffère d'une année à l'autre. A cela s'ajouterai la diversité des conditions de culture, le nombre élevé de variétés et de systèmes de conduite. De nombreuses années d'observations sont nécessaires pour caractériser sa croissance et son développement et sa relation avec le climat et les apports hydriques.

Vu l'importance que revêt l'espèce dans notre pays, la compréhension du fonctionnement de l'arbre au cours de son cycle de développement ou à une échelle de temps plus longue est nécessaire. Les recherches ont été souvent orientées vers la détermination de la réponse de la culture à *un* facteur physique donné alors que la réponse de l'olivier devrait être intégrée dans une étude globale du système Sol-Olivier-Climat en raison des interactions entre les facteurs extrinsèques et

intrinsèques. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail dans lequel on se propose d'étudier le comportement de quatre variétés d'olivier couramment cultivées dans les plantations intensives en relation l'environnement et plus particulièrement l'alimentation hydrique. L'objectif est de quantifier la croissance de l'arbre pendant les premières années de culture en vue de la modélisation, à travers l'élaboration de relations simples entre la croissance des différentes parties de l'arbre d'une part et les facteurs externes qui l'affectent d'autre part, pour aboutir enfin au développement d'un modèle de calcul des besoins en eau en rapport avec la croissance des parties aérienne et souterraine.

A-ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

REPONSE PHYSIOLOGIQUE DE L'OLIVIER A L'APPORT D'EAU

1. Croissance et développement

Chez l'olivier la croissance des rameaux est affectée par la disponibilité de l'eau (Mickelakis, 1995). Les arbres irrigués présentent une croissance vigoureuse avec des entre-nœuds longs par rapport à ceux qui ne le sont pas. L'accroissement engendré par l'irrigation varie de 10 à 30% selon la variété. Chez l'Arbéquina, Sole-Riera (1990) montre que la longueur de la pousse de l'année (L, cm) est étroitement liée à la quantité d'eau reçue par la pluie du mois de mai (P) et à la dose d'irrigation (I) **(Equation 1).**

$$L = 7{,}41 + 0{,}038\ P + 0{,}019\ I \qquad (R^2 = 0{,}66) \quad [1]$$

Le diamètre du tronc augmente de 10 à 20% en fonction de la quantité d'eau apportée. Il est considéré comme un bon indicateur de l'état hydrique du végétal (Goldhamer et Fereres, 2001) étant donné qu'il peut varier significativement pour des apports d'eau réduits (Granier, 1987 b). Le **Tableau 1** montre l'effet de l'irrigation sur la croissance de l'olivier 'Ascolana' en fonction du traitement appliqué (Dettori, 1987).

Tableau 1. Effet de l'irrigation sur la croissance du tronc (cm) chez l'olivier 'Ascolana' cultivé dans la région de Sardaigne selon l'écartement de 4mx4m (Dettori, 1987).

Traitement annuel moyen	Quantité d'eau apportée (m^3/ olivier)	Croissance du tronc
0,60 E	3,9	17,6 c
0,50 E	3,3	17,4 c
0,40 E	2,7	13,4 b
Témoin	0,0	10,4 a

E: lecture bac classe A. Les valeurs suivies de lettres différentes présentent un écart significatif au seuil 5%.

Chez les arbres irrigués la croissance du tronc est étroitement liée à la charge en olives (Connor et Fereres, 2005). En année « moins » et après une forte production, le tronc se développe lentement au cours du printemps. Sa croissance atteint des valeurs maximales à la fin de l'été. Au contraire, au cours d'une année de forte charge en fruits, la croissance printanière est rapide mais elle ralenti en été et en automne à cause de l'augmentation de la compétition trophique imposée par les fruits en développement.

2. Floraison et nouaison

Les taux de floraison et de nouaison sont affectés par les apports d'eau qui précèdent la floraison. Stylianou et Metochis (1982) ont observé sur huit variétés d'olivier cultivées à Chypre une floraison plus précoce, plus abondante et regroupée en deux à trois semaines chez les oliviers irrigués. L'arrêt de l'irrigation pendant les mois de mars et d'avril engendre la formation d'un grand nombre de fleurs imparfaites. Chez la variété « Galegua vulgar » le taux de nouaison a varié de 0,55 chez les arbres irrigués à 0,34% chez les oliviers conduits en pluvial (Fernandez Serrano et Vincent Abela, 1982).

L'effet du manque d'eau sur la floraison dépend du moment où il sévit. A la fin de l'été, le stress hydrique retarde la floraison de l'année suivante à cause de la défeuillaison qu'il peut provoquer. Pendant les stades initiaux de développement floral (début mars), le manque d'eau est préjudiciable à la production des inflorescences. Si la contrainte hydrique a lieu plus tard, les fleurs avortent.

3. Développement radiculaire

Les racines d'oliviers irrigués se concentrent autour du point d'eau à une profondeur variant de 20 à 70 cm en fonction de la nature du sol et du mode d'irrigation avec un maximum de racines observé entre 40 et 60 cm (Michelakis, 1986 ; Fernandez et al.,1990). En irrigation localisée les valeurs habituelles de la densité radiculaire varient de moins de 0,1 à 1,0 cm cm^{-3} de sol selon l'endroit (Connor et Fereres, 2005).

4. Production

Les rendements obtenus varient en fonction de la période d'apport de l'eau, de la quantité appliquée et de la variété. Chez l'olivier 'Memecik', les apports d'eau en période de préfloraison (0,1 ETP) doublent le rendement en olives (Ozyilamaz et Ozkara, 1989). Chez les variétés de table 'Kalamon et Amfissis', la production a augmenté avec l'irrigation mais sans effet significatif entre les traitements 0,3 et 0,6 ETP (Michelakis 1990). Chez l'olivier adulte Picual, des rendements maximums en olives et en huile sont obtenus pour un apport hydrique équivalent à 4 mm/jour **(Tableau 2).**

Tableau 2. Effet de l'irrigation sur la production d'olives et d'huile chez la variété « Picual » plantée selon l'écartement de 8mX4m (Humet-Riegos, 1981)

Apport (mm/jour)	m^3 d'eau/ olivier	ETP-Peff Irrigation	Production kg/arbre	Production d'huile kg/olivier	Kg olives/ m^3
0,0	0,0	6,1 c	18,5	3,1	-
0,5	2,3	6,2 c	20,1	3,1	8,7
1,0	4,0	5,3 b	23,5	4,0	5,9
2,0	7,9	3,8 a	26,5	3,8	3,4
3,0	11,2	-	29,1	4,5	2,6
4,0	13,8	-	36,6	4,5	2,7

NB: Les valeurs suivies de lettres différentes présentent un écart statistique significatif au seuil de 5%.

La variété 'Picual' donne une production maximale de 36,6 kg d'olives par arbre pour un apport d'eau de 13,8 m^3 par olivier / an. L'efficience maximale est observée pour le traitement 0,5 mm/jour. Chez la variété 'Ascolana' la dose de 3,9 m^3/ha/an, correspondant à 60% de l'évaporation, a permis de doubler son rendement en olives et augmente leur poids de 36% par rapport au témoin **(Tableau 3).** Les productions maximales sont obtenues avec des doses de 0,5-0,6 Ebac.

Tableau 3. Effet du traitement hydrique sur la production et le poids des olives chez de jeunes oliviers « Ascolana » plantés selon un écartement de 4mx4m en rapport avec les quantités d'eau délivrées (Dettori, 1987).

Traitement annuel	m^3/olivier^{-1} an^{-1}	Production (T/ha)	Poids des olives (g)
0,6 E	3,9	6,1 c	6,6 c
0,5 E	3,3	6,2 c	6,4 c
0,4 E	2,6	5,3 b	6,1 b
Témoin	0,0	3,8 a	4,2 a

E = lecture du bac classe A. Les valeurs suivies de lettres différentes présentent un écart significatif au seuil de 5%.

Les travaux entrepris en Tunisie sur l'olivier 'Chemlali' (Lakhoua, 1982) ont permis de définir une corrélation positive entre le rendement (Y) en olives de l'année (n) et la pluviométrie (P, mm) de l'année écoulée **(Equation 2).**

$$Y = 0{,}144\ P + 0{,}296 \quad [2]$$

Sous irrigation, le rendement de cette variété augmente significativement bien qu'il soit fortement affecté par l'alternance de la production (Bouaziz, 1983). Le rendement maximal est obtenu pour 0,4 ETP en régime continu.

5. Qualité du fruit

L'irrigation augmente significativement le calibre des olives, l'épaisseur du mésocarpe et le rapport mésocarpe / noyau, mais elle réduit le pourcentage de matière sèche des fruits (Dettori et Russo, 1993). Sous irrigation, la croissance du fruit se poursuit au cours de la saison estivale, notamment chez la variété 'Picual' (Manrique, 1998). Le **Tableau 4** présente les résultats obtenus en Sardaigne sur la variété 'Ascolana' (Dettori, 1987). Sa meilleure réponse à l'eau est obtenue pour 42% de l'évaporation bac.

Tableau 4. Effet de la dose d'irrigation sur le rendement et la pomologie de l'olive « Ascolana » (Dettori, 1987).

Traitement	Rendement (t/ha)	Poids des olives (g)	Epaisseur du Mésocarpe (mm)	Epaisseur du noyau (mm)	Rapport mésocarpe/ noyau
0,42 E	6,8 d	6,6 c	13,3 c	7,6 b	1,8 b
0,25 E	5,7 c	6,5 c	12,6 c	7,1 b	1,8 b
0,13 E	3,3 b	5,1 b	11,5 b	6,6 a	1,7 a
Témoin	1,5 a	4,5 a	10,0 a	5,9 a	1,7 a

E = évaporation moyenne du bac classe A. Les valeurs suivies de lettres différentes présentent un écart significatif au seuil de 5%.

Sole-Riera (1990) montre que l'irrigation de l'olivier 'Arbéquina' entre mi-mai et mi-septembre augmente le poids des olives de 50%, la production de l'huile de 137% et la teneur en huile (T_{huile}, %) de 24%. Il définit une relation **(Equation 3)** entre le poids des olives (P_{olive}, g), la quantité d'eau de pluie reçue au cours des mois de mai et de juin ($P_{mai+juin}$, mm) et l'irrigation (I, litre/arbre/irrigation). La teneur en huile est corrélée à la dose d'irrigation (I, litre/arbre/irrigation) et à la production d'olives (P_{olive}, kg/arbre) avec des coefficients de détermination de 0,61 et 0,57 respectivement **(Equations 4 et 5).**

$$P_{olive} = 22,91 + 0,08\ P_{mai+juin} + 0,044\ I \quad (R^2 = 0,72) \quad [3]$$

$$T_{huile} = 15,57 + 0,024\ I \quad \text{et} \quad T_{huile} = 17,55 + 0,2239\ P°_{olive} \quad [4\text{-}5]$$

Les travaux récents de Moriana et al., (2003 et 2006) concordent avec ces résultats et recommandent l'apport de l'eau en période d'accumulation de l'huile.

6. Efficience de l'utilisation de l'eau en Oléiculture

L'efficience de l'utilisation de l'eau en oléiculture dépend de la région et du système de conduite (Le Bourdelles, 1982 et 1984). Elle atteint 0,4 et 0,5 kg/m^3 sous de bonnes conditions culturales et en culture pluviale (Vernet et al., 1970). En terre marginale et sous climat de Sfax, la productivité chute à moins de 0,15 kg/m^3. Sous irrigation, elle varie de 1,0 à 1,5 kg/m^3 d'eau apporté **(Tableau 5).** Dans d'autres sites (Australie), des valeurs moyennes variant de 0,4 à 2,1 kg/litre d'eau consommée ont été trouvées par Nuberg et Yanusa (2003). Elles passent à 0,9 et 2,8 kg/litre lorsque l'EUE est exprimée par rapport à la quantité d'eau transpirée.

Tableau 5. Efficience de l'utilisation de l'eau (EUE, kg d'olives/m^3 d'eau apporté) en oléiculture pour diverses conditions culturales et climatiques (Vernet et al., 1970).

	Dose m^3/ ha	Surface / olivier (m^2)	m^3 d'eau / olivier	Récolte Kg / olivier	kg d'olives / m^3 d'eau
Oliviers irrigués ETR/ETP= 0,94 (CEE)	13000	36	47	24,7	0,52
Oliviers irrigués ETR/ETP= 0,60 (CEE)	8300	36	30	25,4	0,85
El Aouareb P=250 mm et I= 370 mm	6200	61	38	29,0	0,77
Olivier irrigué ETR/ETP = 0,40 (CEE)	5700	36	20	23,5	**1,17**
Olivier pluvial (Tunis)	4500	144	65	30,0	0,50
Enfidaville	3800	256	97	50,0	0,50
Sfax, terre très légère sulamite	1700	576	100	42,0	0,42
Sfax, sol légèr	1900	576	112	44,0	0,39
Sfax, sous-sol lourd et salé	1600	576	94	24,0	0,25
Sfax, plantation dense (plus épandage)	1900	345	66	23,0	0,35

CHAPITRE II

CONSOMMATION EN EAU DE L'OLIVIER ET METHODES DE MESURES

1. Introduction

La consommation en eau de l'olivier et sa réponse à l'apport hydrique varient en fonction de la période d'apport, de la variété et des conditions culturales et environnementales. Elles dépendent également du mode de conduite et notamment de la densité de plantation. En effet, l'évapotranspiration des cultures arboricoles présente une variabilité spatiale importante du fait que la végétation ne couvre qu'une partie du sol. Dans de telles situations, l'hétérogénéité du système rend difficile l'estimation des quantités d'eau utilisées au niveau de chacune de ses composantes (Abid-Karray, 2006), ce qui nous conduit à entreprendre des mesures séparées de l'évaporation du sol et de la transpiration de l'arbre, nécessitant le recours à au moins deux méthodes de mesures, dont l'une sera appliquée à l'échelle du verger et l'autre au niveau de l'arbre. Le choix de la méthode de mesure dépend de la précision requise, de la disponibilité du matériel de mesure et des données climatiques et édaphiques (Rana et Katerji, 2000).

Les méthodes classiques d'estimation des besoins en eau des cultures tel que le bilan hydrique, la méthode climatique et la lysimétrie sont largement utilisées en arboriculture bien qu'elles présentent certaines limites en raison de la variation de l'espacement entre les plants et la couverture partielle du sol. Dans ce cas, la part de la transpiration de l'arbre et celle de l'évaporation directe du sol n'est pas clairement définie. La mesure du flux de la sève brute peut constituer dans ce cas une alternative intéressante pour estimer la consommation en eau de

l'arbre et contourner les problèmes liés à l'hétérogénéité du sol, mais elle ne peut être considérée seule.

2. Paramétrisation des termes de l'évapotranspiration (ET)

2.1. Evapotranspiration dans les conditions standards

L'évapotranspiration de référence (ET_o, mm/jour) est déterminée par mesure lysimétrique dans des conditions standardisées ou à l'aide de la formule de Penman-Monteith (PM) (Allen et al., 1998) qui nécessite des mesures de la température, de l'humidité relative de l'air, du rayonnement global et de la vitesse du vent.

L'évapotranspiration maximale d'une culture (ET_c) est définie pour des conditions optimales d'alimentation hydrique et minérale en vue d'une production maximale (Allen et al., 1998). Elle est le résultat d'un équilibre entre la demande climatique qui est exercée sur la surface évaporante et l'eau disponible dans le sol. L'ET_c dépend de l'espèce, de la couverture du sol et des pratiques culturales. En région Méditerranéenne les valeurs de l'évapotranspiration chez l'olivier varient en fonction de l'ET_o entre 560 et 800 mm. Dettori (1987) rapporte des valeurs comprises entre 560 et 620 mm selon la région pour une valeur de ET_o comprise entre 1000 et 1200 mm. Fereres et al., (1998)-cités par Fernandez et Moreno (1999)- l'ont estimé à 700-800 mm pour le Sud de l'Espagne où l'ET_o est de l'ordre de 1400 mm.

Le besoin en eau d'une culture durant une période donnée est la hauteur d'eau (mm) nécessaire pour compenser les pertes par évapotranspiration pendant cette période (Allen et al., 1998). L'approche de la F.A.O. exprime cette quantité en fonction de l'évapotranspiration de référence (ET_o) -qui traduit la demande climatique- et des caractéristiques de la culture. Ces caractéristiques dépendent de l'espèce, de la variété, de l'âge, du stade phénologique et du mode de conduite et sont représentées par un coefficient dit cultural K_c **(Equation 6).**

$$ET_c\ (mm) = K_c * ET_o\ (mm) \quad [6]$$

Le coefficient cultural (K_c) est donné dans le bulletin n°56 de la F.A.O. (1998) (Allen et al., 1998) sous forme de table pour les différentes espèces en fonction du stade de développement. Ces valeurs ont été établies pour des pratiques culturales moyennes et des conditions standard. Pour les cultures ou les stades pendant lesquels le sol n'est pas totalement couvert par la végétation, la part de l'évaporation est importante lorsque la surface du sol est humidifiée à la suite d'une pluie ou d'une irrigation. Dans ce cas, le coefficient cultural simple (K_c) qui intègre les deux composantes : transpiration de la culture et évaporation directe du sol, ne traduit pas correctement la situation. L'approche utilisant le coefficient cultural double **(Equation 11)** permet de considérer ces deux processus séparément. Le coefficient K_c est dans ce cas la somme du coefficient de base K_{cb} qui représente la transpiration de la plante et du coefficient K_e qui tient compte uniquement de l'évaporation du sol.

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad [7]$$

Pour l'olivier adulte conduit en intensif ayant un pourcentage de couverture supérieur à 60%, la valeur donnée dans le bulletin n°56 de la F.A.O. (1998) (Allen et al., 1998) du coefficient simple est 0,65-0,70 selon le stade phénologique. Pour le coefficient double, la valeur du coefficient de base K_{cb} est de 0,55-0,65 alors que K_e est calculé à l'aide de l'équation du bilan hydrique dans la zone humectée par la pluie ou l'irrigation ou par la méthode microlysimétrique (Bonachela et al., 1999).

2.2. Evapotranspiration de l'olivier dans les conditions non standards

En arboriculture fruitière et particulièrement dans les vergers oléicoles, la densité de plantation, l'âge des arbres et le mode de conduite affectent considérablement le pourcentage de couverture du sol et le

rapport transpiration de la culture/évaporation du sol. De ce fait, l'estimation des besoins en eau par la méthode du bilan hydrique peut conduire à certaines erreurs liées à l'hétérogénéité de la couverture du sol notamment au niveau du stock d'eau et de la conductivité hydraulique. L'utilisation de ce bilan en oléiculture pour déterminer les besoins réels en eau de la culture à l'échelle de l'année ou de la saison d'irrigation est rapportée dans de nombreux travaux. Mais pour les différents stades phénologiques ou pour des périodes plus courtes, Villagra et al., (1995) et Nuberg et Yanusa (2003) et Habaieb et Masmoudi-Charfi (2003) recommandent l'utilisation des méthodes basées sur les observations climatiques et les paramètres culturaux.

Pour des oliviers adultes, le volume de la frondaison évolue peu en dehors des périodes de taille. De ce fait, le coefficient K_c peut être considéré comme indépendant de l'âge mais présente des variations saisonnières liées à la physiologie de l'arbre et à l'état hydrique du sol. Les valeurs rencontrées dans la littérature se situent entre 0,45 et 0,70. Les travaux entrepris durant la dernière décennie au Sud de l'Espagne (Fernandez et Moreno, 1999) ont permis de situer les valeurs moyennes mensuelles de K_c pour des plantations adultes et irriguées d'olivier, d'une densité comprise entre 250 et 300 pieds/ha et couvrant 30 à 35% du sol **(Tableau 6).** Elles pourraient être adoptées en première approximation dans les oliveraies du Nord de la Tunisie.

Tableau 6. Valeurs mensuelles de K_c pour des oliviers adultes plantés au Sud de l'Espagne à la densité de 286 pieds/ ha et couvrant 34% du sol (Fernandez et Moreno, 1999).

	J-F	M	A	M	J	Jt-A	S	O	N	D
Kc	0,5	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,55	0,6	0,65	0,5

La variation des valeurs de K_c traduit la variation de l'activité de la plante et celle de l'état hydrique du sol en surface. Durant les mois du printemps et de l'automne, les vagues de croissance végétative et la fréquence élevée de l'humectation du sol par les pluies se traduisent par

des valeurs élevées de K_c. En période estivale, les faibles valeurs de K_c sont le résultat du ralentissement de l'activité physiologique de la plante et de la diminution des évènements pluvieux.

Afin de tenir compte des variations du pourcentage de couverture du sol liées à la densité de plantation, l'utilisation d'un facteur de correction (K_r) est proposée (C.O.I., 1997). Dans ce cas l'évapotranspiration est exprimée par **l'équation 8.**

$$ET_c = ET_o \times K_c \times K_r \quad [8]$$

Les valeurs de K_r à utiliser lorsque le pourcentage de couverture du sol par la végétation est inférieur à 60% sont données au **Tableau 7** (C.O.I. 1997).

Tableau 7. Valeurs du coefficient K_r pour différents pourcentages de couverture du sol par la végétation (C.O.I., 1997).

Pourcentage de couverture du sol par la végétation	K_r
Plus de 50%	1,00
40 - 50 %	0,90
35 - 40 %	0,80
30 - 35 %	0,75
Inférieure à 30 %	0,70

Durant les premières années après la plantation, la croissance relative de l'olivier est rapide. La masse transpirante ainsi que le surface couverte du sol sont faibles et varient considérablement d'une année à l'autre, ce qui place les cultures dans des conditions non standards. L'adoption d'une valeur du coefficient cultural adaptée à l'âge de l'arbre est nécessaire pour tenir compte de ces écarts. Pour de jeunes oliviers âgés de moins de six ans. Le Bourdelles (1977) suggère une valeur de K_c entre 0,3 et 0,5 et recommande l'utilisation de la valeur 0,3 pendant les deux premières années après plantation, la valeur de 0,4 pour les trois années suivantes et à partir de la cinquième année, la valeur de 0,5. Des

valeurs comparables ont été rapportées par Cruz Conde et Fuentes (1989) pour de jeunes oliviers de la variété 'Picual', cultivés au Sud de l'Espagne avec différents écartements. Les valeurs obtenues de K_c ainsi que celles relatives à la consommation journalière en eau durant la période allant de juin à août sont présentées au **Tableau 8.** Le rapport T/ETP peut être considéré comme étant le coefficient cultural en dehors des périodes ou le sol est humecté en surface.

Tableau 8. Variation du coefficient cultural et des pertes d'eau par transpiration (T) de l'olivier 'Picual' en fonction de la densité de plantation. Valeurs observées sur de jeunes oliviers bien développés cultivés dans la région de Cordoue, Espagne (Cruz Conde et Fuentes, 1989).

Nombre d'oliviers/ha	Pourcentage de couverture du sol	Tmax/jour (l/olivier)	Dose (mm/jour)	T / ETP
100 (10mx10m)	25	135	1,35	0,25
150 (8mx8m)	36	103	1,53	0,29
200 (7mx7m)	40	85	1,70	0,32
250 (6mx7m)	43	73	1,82	0,34
300 (6mx6m)	45	65	1,95	0,36
400 (5mx5m)	50	54	2,16	0,40

NB: Valeur moyenne transpirée/olivier jeune durant la période juin-août: 0,35 l m^{-2} de feuille. Evaporation bac A de 6,6 mm et ETP-Thorntwhite de 5,4 mm. ETP (avril-octobre): 820 mm.

3. Méthodes de détermination de l'évapotranspiration des cultures

Les méthodes de mesure de l'ET_c sont classées selon leur concept de base en trois approches : hydrologique, micro météorologique et physiologique (Cohen, 1991 ; Rana et Katerji, 2000).

3.1. Approche hydrologique

L'approche hydrologique permet de mesurer l'évapotranspiration des cultures sur de longues périodes allant de quelques semaines à quelques mois, voir la totalité du cycle de développement. L'utilisation des lysimètres à balance et l'équation du bilan hydrique du sol sont les méthodes les plus utilisées notamment en oléiculture (Rana et Katerji, 2000).

3.1.1. Bilan hydrique du sol

Etant donné le principe de conservation de la masse appliqué au sol, la variation du stock d'eau (ΔS) au niveau de la zone radiculaire (z) entre deux dates données correspond à la différence entre la quantité d'eau apportée par les précipitations (P), l'irrigation (I) et la remontée capillaire (W) et celle qui est perdue par l'évapotranspiration de la culture (ET_c), le ruissellement (R) et la percolation profonde (D). L'intégration de ces composantes donne lieu à l'équation du bilan hydrique **(Equation 9)** qui s'écrit :

$$P + I + W - ETc - R - D = \pm [\Delta S]_0^z \quad [9]$$

L'évapotranspiration de la culture (ET_c) est égale à la quantité d'eau utilisée par la culture et évaporée du sol. Elle est déterminée de manière indirecte par déduction, après avoir estimé les autres paramètres de l'équation.

La quantité d'eau ruisselée dépend des caractéristiques du sol mais surtout de la fréquence, de la quantité, de la durée et de l'intensité des précipitations. Lorsque celles-ci dépassent la capacité d'infiltration de l'eau du sol, l'eau ruisselle.

La percolation profonde ou drainage correspond à la quantité d'eau perdue au-delà de la rhizosphère et de ce fait elle devient indisponible à la culture. Elle est fonction des caractéristiques du sol (texture, structure,

profondeur, pente, perméabilité), du climat et de l'échelle du temps considérée pour l'étude. Elle est généralement négligeable à l'échelle de la journée si l'apport de l'eau par les précipitations ou par l'irrigation ne dépassent pas la capacité de rétention du sol.

La montée capillaire peut constituer chez les arbres à enracinement profond cultivés en régime pluvial une source importante d'apport de l'eau au cours des périodes sèches, dans quel cas, elle ne peut être négligée.

La variation du stock d'eau dans le sol est définie par la différence entre le stock final (S_f) et le stock initial (S_i) observés à deux dates données. Ces stocks sont déterminés à partir de mesures de l'humidité du sol. Celle-ci est obtenue à partir de mesures gravimétriques, neutroniques (sonde à neutrons) ou par lecture directe au moyen du « *Time Domain Reflectometry* » (TDR). La méthode gravimétrique est utilisée pour une grande échelle de temps à cause de son caractère destructif. L'utilisation de la sonde à neutrons peut constituer une alternative intéressante, mais elle pose le problème de l'étalonnage et de l'échantillonnage. De plus, l'apparition des fentes de retraite sur sol argileux en phase de dessèchement poussé engendre des erreurs de mesure. L'utilisation du « TDR » permet de mesurer correctement l'humidité du sol sous climats tempérés et semi-arides à une échelle de temps réduite, mais cet appareillage n'est pas adapté aux sols argileux.

Comme il est difficile de mesurer tous les paramètres de l'équation du bilan hydrique (Palomo et al., 2002), des simplifications sont souvent effectuées, notamment pour les composantes du drainage (lorsque le stock d'eau résultant d'un apport hydrique ne dépasse pas la capacité au champs), du ruissellement (au niveau des sols à texture sableuse ou a faible pente) et de la montée capillaire (lorsque la nappe d'eau est très profonde). L'équation simplifiée du bilan **(Equation 10)** devient :

$$P + I - ETc = \pm [\Delta S]_0^z \qquad [10]$$

Le stock d'eau (S, mm) est exprimé en fonction de l'humidité volumique H_v (%) et de la profondeur (D, m) par **l'équation 11.**

$$S = 10\, H_v\, D \quad [11]$$

Les erreurs de mesures relatives à la méthode du bilan hydrique dépendent de la précision relative à chaque composante de l'équation.

3.1.1.1. La méthode gravimétrique

Cette méthode permet de déterminer directement l'humidité volumique du sol. Elle consiste à prélever des échantillons de sols à la tarière sur une profondeur donnée avec un pas de mesure régulier. Les échantillons mis dans des boites hermétiques en aluminium sont pesés frais et après séchage à l'étuve à 105°C jusqu'à constance du poids. La variation du poids avant et après séchage donne la teneur en eau de l'échantillon de terre. Cette méthode constitue la méthode de référence par rapport à laquelle d'autres sont calibrées. Elle est peu coûteuse, simple mais destructive et ne peut être réalisée qu'à une échelle de temps de la semaine ou plus.

3.1.1.2. La sonde à neutrons

Elle permet de déterminer l'humidité du sol en se basant sur les propriétés de réflexion d'un flux de neutrons issu de la sonde par les atomes d'hydrogène présents au niveau des molécules d'eau du fait qu'ils disposent des mêmes propriétés physiques.

La mesure à la sonde s'effectue à différentes profondeurs avec un pas régulier au moyen d'un tube en alliage d'aluminium ou en PVC, d'extrémité conique, implanté dans le sol à une profondeur donnée. Lorsque la sonde est mise en marche, un flux de neutrons est émis par une source radioactive qui diffuse dans toutes les directions. Au fur et à mesure que ces neutrons se déplacent dans le sol, ils se heurtent à différents atomes et perdent progressivement leur énergie cinétique. Une

partie d'entres eux, rencontrant les atomes d'hydrogène des molécules d'eau, est renvoyée vers la sonde en créant des impulsions. Le nombre d'impulsion est enregistré par le compteur de la sonde pour une durée de temps déterminée. Ces enregistrements sont traduits en humidité volumique par le biais d'une courbe d'étalonnage établie dans les mêmes conditions de mesures. Elle exprime l'humidité volumique du sol (%) déterminée par gravimétrie en fonction des comptages corrigés par rapport à la mesure dans l'eau et mesurés dans les mêmes endroits par la sonde.

Des erreurs de mesures sont observées lorsque le tube n'est pas adhérant au sol en raison de la présence de l'air entre les deux surfaces solides. Le même problème est observé lorsque les mesures sont réalisées à proximité de la surface du sol du fait que la sphère d'influence de la source de neutrons varie de 15 à 30 cm. Une partie des neutrons émis peut s'échapper vers l'atmosphère et leur nombre ne sera pas comptabilisé. L'utilisation d'un réflecteur neutronique en plastique entourant le tube limite ces réflexions. Quant à la mesure de surface, elle est déterminée par gravimétrie.

Cette méthode permet de faire plusieurs mesures au même endroit et rapidement. Elle présente cependant certaines limites liées à l'utilisation de la sonde elle-même (technicité, sécurité, étalonnage) et à la difficulté d'installation des tubes surtout en sol lourd et dans les plantations arboricoles (étanchéité, choix de l'emplacement). La précision de la méthode dépend de l'étalonnage de la sonde. Les erreurs de mesures sont généralement liées à la présence de l'air autour des tubes et au changement de la côte de mesures d'une date à l'autre. Sa précision est de ±0,02 cm^3cm^{-3}.

3.1.1.3. La sonde TDR

L'humidité du sol est déterminée par lecture directe. Elle est basée sur le principe de réflexion d'une impulsion électromagnétique envoyée au moyen d'un guide d'ondes placé à une profondeur donnée. La réponse de cette réflexion est analysée en termes de temps de transit et de retour de l'impulsion. Elle est d'autant plus rapide que le sol est pourvu d'eau.

Cette méthode est peu destructive, ne nécessite pas d'étalonnage spécifique, fournit une réponse instantanée, mais les mesures ne se font qu'à un seul endroit à la fois, limitant de ce fait le volume échantillonné. Sa précision est inférieure à 2% sous climat tempéré et semi-aride.

3.1.2. Lysimètres à balance

Les lysimètres mesurent directement l'évapotranspiration de la culture. Ils sont constitués par un ensemble isolé et étanche de sol - culture à travers lequel on étudie le mouvement de l'eau. Les lysimètres à balance donnent des mesures précises de l'ET_c (Deidda et al., 1990) en mesurant les variations du stock d'eau par pesée à une échelle de temps qui va de la minute au mois (Steduto, 1996). Le niveau de précision sous climat tempéré est de 10% à l'échelle quotidienne et varie de 10 et 20% à l'échelle horaire. Cependant elle pose les problèmes de lourdeur de l'implantation du système avec un minimum de perturbation du sol et de la représentativité de l'échantillon puisque les conditions réelles en verger sont différentes de celles du lysimètre.

3.2. Approche micro - météorologique

Les méthodes micro météorologiques permettent de déterminer l'évapotranspiration à partir de paramètres climatiques mesurés au niveau de la surface évaporante. Elles peuvent fournir des mesures de l'évapotranspiration à l'échelle de l'heure au mois et s'appliquent aux superficies étendues à sol plat et à végétation homogène et uniforme afin de se placer dans les conditions de conservation des densités des flux d'énergie (Steduto, 1996 ; Rana et Katerji, 2000). L'utilisation de cette approche demeure du domaine de la recherche puisqu'elle nécessite une instrumentation délicate et le recours au stockage et au traitement des données. Trois méthodes principales sont utilisées : la méthode du bilan d'énergie, la méthode aérodynamique et la méthode des corrélations turbulentes « Eddy covariance ».

3.2.1. Méthode du bilan d'énergie

L'évapotranspiration λ E considérée sous l'angle énergétique, peut être déterminée à partir de l'équation du bilan des flux d'énergie pour une surface évaporante donnée. Elle est exprimée par **l'équation 12.**

$$Rn - G = H + \lambda E \quad [12]$$

Avec R_n ,la radiation nette (W m^{-2}), G est le flux de chaleur au niveau du sol (W m^{-2}) estimé à partir de données climatiques, H est la densité de flux de chaleur sensible (W m^{-2}) et λ E est le flux de chaleur latente et terme du bilan qui représente l'évapotranspiration. Cette équation considère uniquement les flux d'énergie verticaux. Les transferts latéraux par advection sont négligés (Allen et al., 1998 ; Rana et Katerji, 2000). La méthode est plus précise lorsque les faibles variations de pression de vapeur de l'air et de température sont détectées.

3.2.2. Méthode aérodynamique

La méthode aérodynamique suppose que la densité de flux d'énergie est liée au gradient de concentration (Rana et Katerji, 2000). Le flux de chaleur latente λ E est exprimé en fonction de la vitesse du vent et de l'humidité spécifique de l'air pour un niveau de mesure donné.

La méthode est d'autant plus précise que le nombre de niveaux de mesure de la vitesse du vent et des profils de température est important (supérieur à 3). Elle demeure cependant peu précise lorsqu'elle est appliquée au-dessus de plantes hautes (Rana et Katerji, 2000).

3.2.3. Eddy covariance

Etant donné que le transport des quantités scalaires ou vectorielles en basse atmosphère et au contact de la végétation est gouverné par la turbulence de l'air, les flux d'énergie au niveau de la surface peuvent être

mesurés en corrélant la dispersion verticale du vent aux fluctuations de la concentration du mélange. L'évapotranspiration (λE) peut donc s'exprimer en fonction de la vitesse du vent (w) et de la densité de vapeur d'eau (q) (Steduto, 1996 ; Rana et Katerji, 2000 ; Villalobos et al., 2000 ; Testi et al., 2004). L'évapotranspiration (λE) est donnée par la moyenne des mesures instantanées de w et q **(Equation 13)** notées w' tel que:

$$\lambda\ E = \lambda\ \overline{w'\ q'}\quad [13]$$

La méthode d'Eddy covariance est complexe. La mesure fréquente de w'et de q' en continu et sur une longue période constitue une contrainte sur le plan instrumentation. De plus, la configuration géométrique des capteurs météorologiques peut être à l'origine de la distorsion des flux. La séparation spatiale ente l'anémomètre et l'hygromètre peut entraîner un manque de corrélation entre la vitesse du vent et l'humidité de l'air.

3.3. Approche physiologique

Les méthodes physiologiques permettent de quantifier la transpiration d'un couvert végétal et d'affiner la connaissance des relations hydriques entre le sol et la plante (Steduto, 1996). Elles concernent souvent des périodes limitées allant de quelques minutes au jour et s'appliquent aux arbres, aux plantes ou aux parties de plantes. L'extrapolation des résultats observés au niveau de l'organe ou de l'individu à l'ensemble du couvert végétal est délicate. De nombreuses méthodes sont décrites dans la bibliographie telle que la porométrie, l'utilisation du système de chambre d'assimilation et de transpiration et les techniques de mesure du flux de la sève brute.

3.3.1. Système des chambres d'assimilation et de transpiration

Ce système est constitué par une enceinte ventilée qui assure une circulation forcée de l'air de manière à conserver la composition de l'atmosphère par rapport à l'air ambiant. Il permet de connaître le débit général de l'air qui circule dans l'enceinte et l'écart de concentration en vapeur d'eau entre l'entrée et la sortie (Améglio et al., 1993).

La modification de l'atmosphère de l'enceinte constitue une contrainte majeure. La vitesse du vent est en effet fortement réduite dans la chambre. De plus, l'augmentation rapide de la température peut modifier le contrôle biologique de la transpiration. Par ailleurs, le volume de la chambre convient aux plantes annuelles (Rana et Katerji, 2000). Les valeurs de la transpiration obtenues par cette technique ne sont pas absolues et ne peuvent être exploitées qu'à titre comparatif (Steduto, 1996).

3.3.2. Mesure du flux de la sève brute

La transpiration est un processus évaporatoire par lequel l'eau s'échappe à travers les stomates des feuilles vers l'atmosphère sous l'effet de la demande climatique. Lorsque l'eau est disponible au niveau du sol, les quantités transpirées quotidiennement par la plante sont voisines de celles qui sont absorbées par les racines. Par conséquent, le flux d'eau traversant la plante peut être considéré comme conservatif (absorption = transpiration) et la mesure du débit de la sève brute peut fournir une bonne estimation des besoins en eau du végétal.

La mesure du flux de la sève brute permet le suivi de la consommation hydrique des plantes dans un système de culture discontinu à une échelle de temps réduite et de séparer le flux évaporatoire de la plante de celui du sol qu'il soit couvert ou non par une végétation secondaire.

Mise à part les 2 à 5% utilisés pour la photosynthèse et les réactions métaboliques, l'eau absorbée par les plantes transite par le tronc via les tissus conducteurs sous forme de sève brute et s'échappe par

transpiration vers l'atmosphère à travers les stomates des feuilles. Les premières techniques de mesure ont fait appel aux colorants et traceurs spécifiques. Mais l'injection de substances de repérage perturbe la mesure parce qu'elle interagit avec le tissu végétal. De ce fait, les résultats de ces mesures ne peuvent être interprétés quantitativement. En plus, ces techniques sont destructives et ne permettent pas d'études à long terme.

Les techniques de mesure de la vitesse de la sève brute in vivo au moyen de sondes thermiques ont constitué une alternative intéressante pour mesurer la transpiration des arbres en se basant sur la forte capacité calorifique de la sève brute. En effet, son passage à travers les tissus conducteurs de la tige perturbe sensiblement la diffusion de la chaleur dans ces tissus. Ces variations peuvent être mesurées et exprimées en termes de flux. L'amélioration récente des techniques thermoélectriques pour mesurer l'évapotranspiration a permis une utilisation accrue de ces méthodes de mesure qui reposent sur le calcul du flux massique de l'eau en utilisant la chaleur comme traceur.

Malgré les avantages de ces techniques, le caractère individuel de la mesure pose un problème au moment de l'extrapolation des résultats à l'ensemble de la parcelle. Le passage de l'individu au couvert végétal utilise des paramètres caractéristiques de la végétation telle que la structure de la végétation, sa densité de plantation, la hauteur du couvert végétal, l'indice foliaire ou encore la surface conductrice de l'eau (Granier et al., 2000 ; Rana et Katerji, 2000).

4. Méthodes de mesure du flux de la sève brute

4.1. Système vasculaire chez l'olivier

L'olivier est une espèce à bois diffus et poreux caractérisé par une densité élevée (0,623 kg / litre), des fibres abondantes, peu de parenchyme et des vaisseaux conducteurs de faible diamètre (Fernandez et Moreno, 1999). Les vaisseaux du xylème sont constitués de cellules tubulaires à parois épaisses, renforcées vers l'intérieur par des dépôts de

subérine et de lignine qui les protègent de l'effondrement en cas de forte transpiration (Moreno et al., 1996). La lumière des vaisseaux du xylème représente en moyenne 8% de la section du rameau contre 17% chez la vigne.

Le diamètre du xylème varie selon l'organe conducteur. Sur des pousses d'un an, Gullo et Oliveri (1985) ont mesuré des diamètres de 11µm dans la partie proximale de l'entre-nœud, 10 µm au milieu et 8 µm dans la partie distale. Sur des échantillons de tronc d'olivier Manzanille âgé de 29 ans, le diamètre du métaxylème varie de 33 à 39 µm avec un maximum de 50 µm. Fernandez et Moreno (1999) rapportent une valeur moyenne de 10 µm pour des racines d'olivier Manzanille âgées de deux ans. Ces valeurs sont faibles comparativement à celles du Laurier et du Kiwi engendrant une conductance hydraulique faible qui permet de protéger le xylème de la rupture lorsque la transpiration est importante.

Du point de vue structural, les vaisseaux du xylème sont rarement solitaires et généralement groupés radialement en deux ou plusieurs vaisseaux constituant des faisceaux conducteurs. La sève brute absorbée par les poils absorbants des racines est véhiculée jusqu'aux feuilles matures en empruntant en premier un trajet radial extra fasciculaire puis en second lieu un trajet fasciculaire.

Chez l'olivier, la surface conductrice de l'eau dépend de l'âge du rameau. Elle couvre chez le jeune plant la majeure partie du rameau (Moreno et al., 1996). Chez l'olivier adulte la conduction de l'eau est assurée par le bois de l'année. L'eau se trouvant dans les couches internes est peu mobile et n'est pas engagée directement dans la conduction ascendante de la sève brute. Son rôle se limiterait à l'alimentation de l'arbre durant les périodes de sécheresse prolongée (Connor et Fereres, 2005).

4.2. Circulation de l'eau

La sève brute est véhiculée vers l'atmosphère par un courant ascendant maintenu par une chute continue de potentiel entre le sol et les feuilles (théorie de la cohésion). L'ascension de la sève est régie par

l'appel de transpiration et la poussée radiculaire (Cruiziat et Tyree, 1990) qui est un processus actif permettant la reconstitution des réserves hydriques des tissus du végétal.

La transpiration est un processus évaporatoire continu, passif, par lequel l'eau sous tension (sève) monte dans les vaisseaux du xylème et s'échappe à travers les stomates vers l'atmosphère sous l'effet de la demande climatique. Le degré d'ouverture stomatique dépend de l'intensité lumineuse et de l'état hydrique de la plante et du sol (Moreno et al., 1996 ; Palomo et al., 1998).

Le flux d'eau dans le xylème est déterminé par le graduant de potentiel hydrique et la conductance hydraulique **(figure 1)** alors que le mouvement vers ou à partir des tissus de stockage est exprimé par le volume de stockage et la capacitance c'est-à-dire la variation du contenu en eau par unité de variation du potentiel hydrique.

Le flux qui traverse le système sol-plante-atmosphère est décrit selon un modèle assimilé à celui de la loi d'ohm. Larsen et al., (1989) ont adopté cette approche pour estimer la résistance (R, MPa micro g^{-1} cm^2 s) des tissus conducteurs de l'olivier au passage de l'eau en procédant à une mesure des potentiels de base et à midi au niveau du pétiole. La différence entre ces deux potentiels rapportée à la densité de flux transpiratoire correspond à la résistance R. Chez l'olivier cette valeur est de 0,465 et seulement de 0,182 chez le pommier. Une telle valeur élevée de la résistance explique les faibles pertes d'eau par transpiration chez l'olivier et traduit une différence importante entre les potentiels de base – assimilé à celui du sol- et celui qui est mesuré à midi. Chez l'olivier la différence de potentiel est généralement supérieure à 2 MPa avec un maximum mesuré de 4 MPa (Bongi et Palliotti, 1994).

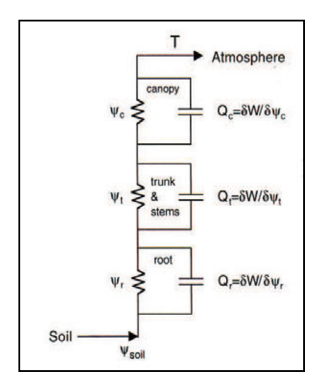


Figure 1. Modèle de transfert de l'eau entre le sol, la plante et l'atmosphère. La transpiration réduit le potentiel de la frondaison Ψ_c qui pompe l'eau des branches, du tronc (Ψ_t), des racines (Ψ_r) et du sol (Ψ_s). Chaque organe est caractérisé par une capacitance (Q), exprimée par le rapport de la variation du contenu en eau en fonction de celle du potentiel (Connor et Fereres, 2005).

Au cours de la journée, le potentiel foliaire de la plante diminue à mesure que la demande évaporatoire augmente pour atteindre un minimum au midi - solaire. Plus tard, dans l'après-midi, il augmente de nouveau pour s'équilibrer avec le potentiel hydrique du sol lorsque son état hydrique le permet. Dans le cas contraire, le potentiel foliaire diminue en deçà du potentiel du sol alors que les tissus de stockage qui contribuent habituellement dans la transpiration avec une proportion variant de 10 à 25%, se réhydratent de plus en plus difficilement.

Afin de maintenir un bon état hydrique de l'arbre, l'olivier limite ses pertes d'eau en modifiant ses caractéristiques morpho anatomiques et en régulant sa pression osmotique interne qui en diminuant permet l'absorption de l'eau à partir de tissus environnants ou du sol. En pratique, l'adoption d'un mode de taille approprié permet de limiter le volume de la frondaison et par conséquent la perte de l'eau par

transpiration (Gucci et Cantini, 2000-cités par Connor and Fereres, 2005- ; Pastor et al., 1998).

4.3. Méthodes de mesures du flux de la sève

Le concept de mesure du flux de la sève a été développé par Huber (1932)-cité par Swanson (1994)-. Depuis, plusieurs techniques ont été développées et utilisées (Cabibel, 1991 ; Cabibel et Do, 1991 a et b ; Cabibel et Isbérie, 1997 ; Fernandez et al., 2001 ; Granier, 1985 et 1987 ; Green, 1993 ; Granier et al., 1996 ; Masmoudi et al., 2004 ; Moreno et al., 1996 ; Nasr, 1987 ; Swanson, 1994). Elles diffèrent selon les paramètres mesurés (temps ou écart de temps), la complexité de l'équipement, le coût de l'installation et le domaine d'application. Certaines techniques nécessitent une calibration préalable ce qui constitue un handicap majeur limitant l'extrapolation des résultats à d'autres espèces. Elle demeure toutefois un moyen de mesure fiable, directe, peu destructif, utilisable en plein champs ou sur des plantes en pot en plus des possibilités d'automatisation qui permettent des mesures à long terme (Yanusa et al., 2000-cités par Abid-Karray, 2006) et en continu, exploitables pour différents domaines d'application (Smith et Allen, 1996).

Les méthodes de mesure du flux de la sève utilisent la chaleur comme traceur thermique, qui est diffusée soit par impulsion soit par dissipation. Ces méthodes sont classées en trois principaux groupes : (1) les méthodes basées sur la vitesse de transfert d'une impulsion de chaleur, (2) celles qui analysent le bilan d'énergie en présence d'une source de chaleur continue ou (3) les méthodes basées sur l'observation de la variation de la température au voisinage d'une source de chaleur connue. Le choix de l'une de ces méthodes ou de l'autre dépend de l'objectif du travail à entreprendre et du type de matériel végétal utilisé.

4.3.1. Méthodes par impulsion de la chaleur

Cette méthode utilise la chaleur comme indicateur de la vitesse de transfert de la sève brute (V en m h^{-1}). Elle consiste à déterminer le temps (t_o) au bout duquel une brève impulsion de chaleur émise par un élément chauffant atteint un point situé à une distance connue en aval de la sonde chauffante (Swanson, 1994). Ce temps de transport est égal à celui qui est mis par la sève pour atteindre le point de mesure en supposant que la chaleur est transportée totalement par convection. Le premier modèle (Huber, 1932) –cité par Swanson, (1994)- est constitué par une sonde unique, chauffante, placée à la surface du rameau et en amont d'un thermocouple. La vitesse de montée de la sève est donnée par **l'équation 14.**

$$V = 144 / (t_o) \qquad [14]$$

En raison de la présence d'un flux conductif associé au transfert convectif de la sève, Huber et Schmidt (1937) –cités par Swanson, (1994)- proposent une deuxième approche dite de « compensation ». Ils utilisent deux sondes placées à la surface du rameau, l'une en amont, servant de référence, l'autre est placée en aval de l'élément chauffant.

Marshall (1958) –cité par Swanson, (1994)- modifie la configuration de Huber et Schmidt (1937) –cité par Swanson, (1994)- en insérant les sondes radialement dans le bois. Il exprime le flux de la sève en fonction de la vitesse d'impulsion de la chaleur et de la diffusivité thermique du bois.

Swanson (1962) –cité par Swanson, (1994)- développe une approche similaire à celle de Huber et Schmidt (1937) –cité par Swanson, (1994)- en insérant les sondes et l'élément chauffant dans le bois. La vitesse de l'onde de chaleur convective (V) est exprimée en fonction du temps (t_o) au bout duquel la différence de température entre les deux sondes d'abscisses x_{amont} et x_{aval} s'annulle **(Equation 15).** Ceci se traduit par l'équation suivante :

$$V = (x_{amont} - x_{aval}) / 2 (t_o) \qquad [15]$$

La méthode d'impulsion de chaleur a été utilisée sur plusieurs espèces, notamment Vitis vinifera (Yunusa et al., 2000-cités par Abid-Karray, 2006), Pinus radiata (Teskey et Sheriff, 1996-cités par Abid-Karray, 2006) et Olea europaea (Fernandez et Moreno, 1996 ; Moreno et al., 1996). Elle présente une faible sensibilité aux graduents thermiques et présente l'avantage du faible coût énergétique et d'investissement. Elle permet de mesurer des débits supérieurs à 60 cm / h mais elle ne convient pas aux faibles débits (Swanson, 1994). Son inconvénient majeur est la ponctualité des mesures qui diminue la précision de la technique alors que la densité du flux de la sève varie en fonction de la profondeur dans le xylème. Cette variation induit une hétérogénéité importante de la densité du flux de la sève mesurée au niveau de la surface conductrice du tronc comme c'est le cas chez l'olivier. Pour disposer d'une mesure représentative du tronc, il est nécessaire de multiplier les points de mesures en considérant différentes profondeurs dans le xylème et plusieurs directions.

4.3.2. Méthode de bilan de chaleur

Développée par Daum (1967)-cité par Nasr (1987)-, cette méthode ne fut utilisée sur la totalité de la section du tronc qu'en 1979 par Sakuratani (Sakuratani, 1979-cité par Nasr 1987-). Par la suite, les travaux se sont multipliés sur différentes espèces (Massai et al., 2000 ; Nasr, 1987), notamment sur jeune olivier de deux ans (Dichio et al., 1998-cités par Fernandez et Moreno, 1999).

La méthode consiste à appliquer une quantité de chaleur de manière continue au niveau d'une section du tronc, à estimer les flux de chaleur conductifs sur la portion chauffée et à déduire les flux convectifs liés au déplacement de la sève et qui sont proportionnels au débit d'eau (Nasr, 1987). Elle est applicable sur des sections de faible diamètre (< 15 cm), ne nécessite ni calibrage ni connaissance de la surface conductrice de l'eau.

4.3.3. Méthodes de dissipation de la chaleur

Cette méthode, développée par Granier (1985, 1987 a et b) est basée sur la dissipation de la chaleur par convection suite à la circulation de la sève. Elle consiste à mesurer au niveau des vaisseaux conducteurs de la sève brute, l'écart de température qui est crée -après dissipation de l'onde de chaleur- entre une sonde de référence et une sonde chauffante. La différence de température obtenue est maximale pour un débit de sève nul et diminue lorsque la vitesse du flux de la sève augmente suite à la dissipation d'une quantité de plus en plus élevée de la chaleur produite par la sonde chauffante.

Testée sur différentes espèces forestières et fruitières, cette méthode a conduit à des résultats concluants. Les mesures obtenues sont cohérentes aux mesures de potentiel hydrique foliaire sur pin (Loustau et al., 1990) et aux mesures gravimétriques effectuées sur Manguier (Mangifera indica) (Lu et Chako, 1998-cités par Abid-Karray, 2006-). De bonnes corrélations ont été également obtenues sur bananier et olivier entre les mesures du flux de la sève et certains paramètres climatiques (Lu et al., 2004), en l'occurrence l'évapotranspiration (Fernandez et al., 2001 ; Moreno et al., 1996). En plus cette méthode semble s'adapter à une large gamme d'espèces ou de matériel végétal. Elle permet d'entreprendre des mesures sur une longue période allant jusqu'à deux saisons de culture (Lu et al., 2004). L'installation de l'équipement est simple, requiert une faible puissance de fonctionnement avec un coût relativement réduit. Nous l'avons adoptée pour mesurer la transpiration de jeunes plants d'oliviers Chétoui (Mahjoub, 2004 ; Masmoudi et al., 2004). La technique est présentée dans ce qui suit de manière plus détaillée.

5. Mesure du flux de la sève par la méthode de dissipation de la chaleur

5.1. Dispositif de mesure

Les capteurs Granier (1985) sont constitués de deux sondes de forme cylindriques de 2 mm de diamètre et de 20 mm de longueur. Elles sont insérées radialement dans le bois et séparées d'une distance variant de 5 à 10 cm. Chaque sonde renferme un thermocouple cuivre - constantan. Les deux thermocouples sont montés en opposition ce qui permet de mesurer l'écart de température entre les deux sondes. La sonde aval (T_m) (placée en haut) est chauffée en continu à puissance constante (10 ohms / 0,2 Watt) au moyen d'un enroulement de fil de constantan enveloppé d'une aiguille en acier inoxydable. La sonde amont (placée en bas) donne la température de référence ($T_{réf}$). Les capteurs sont insérés radialement dans le bois d'aubier et sous écorce. Ils sont alimentés par un courant continu grâce à une batterie. Les signaux émis par ces capteurs sont enregistrés au niveau d'une centrale d'acquisition des données, récupérés puis traités. La **figure 2** présente schématiquement le dispositif de mesures du flux de la sève (Lu et al., 2004).

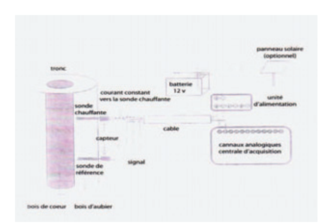


Figure 2. Dispositif de mesure du flux de la sève selon la méthode de dissipation de la chaleur (Granier, 1987). Le capteur est constitué de deux sondes, en haut la sonde chauffante et en bas la sonde de référence, toutes les deux alimentées par un courant provenant d'une batterie, elle-même alimentée par un panneau solaire. Les signaux émis par le capteur sont enregistrés au niveau d'une centrale d'acquisition de données où ils sont stockés (Lu et al., 2004).

5.2. Paramètres de calcul du flux de la sève et calibrage des capteurs

En condition de régime thermique établi entre l'élément chauffant et le milieu (bois+sève) et pour un flux de sève constant, l'apport de chaleur par effet joule est égal à la quantité de chaleur dissipée par convection au niveau de la paroi du capteur (Granier, 1985), exprimé par **l'équation 16.**

$$h\,S\,(T-T_{réf}) = R\,i^2 \qquad [16]$$

Avec :

h : Coefficient de transfert de la chaleur ($W\,m^{-2}\,°C^{-1}$) entre la sonde et le bois,

S : Aire de surface d'échange (m^2),

T : Température du capteur (°C) et $T_{réf}$: Température du bois en l'absence de chauffage (°C),

R : Résistance électrique de l'élément chauffant (Ω) et i : Intensité du courant électrique (A).

Le coefficient h **(Equation 17)** dépend du débit de la sève u ($m\,s^{-1}$) tel que :

$$h = h_o\,(1+ \alpha\,u) \qquad [17]$$

h_o est le coefficient d'échange lorsque la transpiration est nulle (u = 0). Il est calculé à partir de **l'équation 18.**

$$h_o = R\,i^2 / S\,(T_m-T_{réf}) \qquad [18]$$

T_m désigne la température maximale à flux de sève nul (u = 0).

En l'absence de flux de sève, la température autour de la sonde chauffante croît et atteint un point où la chaleur dissipée à travers le bois se met en équilibre avec l'énergie apportée par la sonde chauffante. Une

différence maximale de température s'établit entre les deux sondes. En présence de flux, une partie de la chaleur dégagée par l'élément chauffant est évacuée par convection. Granier (1985) a établit une relation empirique entre l'écart de température mesuré et la densité du flux u qui est indépendante du type de bois étudié **(Equation 19)** telle que :

$$u = 1 / \alpha \times [(T_m - T) / (T - T_{réf})] \quad [19]$$

Le rapport T_m-T / T-$T_{réf}$, noté K est appelé l'indice de flux. Il est proportionnel à u. L'indice de flux a été déterminé expérimentalement par Granier (1985) pour différentes espèces forestières à partir de mesures simultanées de l'exsudat issu de portions de rameaux et le signal donné par le capteur thermique. Cette expérimentation a permis d'étalonner les capteurs indépendamment des caractéristiques de l'arbre ou du bois. Un ajustement non linéaire a conduit à la relation expérimentale suivante **(Equations 20, 21 et 22).**

$$K = 0{,}0206 \times 10^{-6} \times u^{0{,}812} \quad [20]$$

$$\text{où } u = 119 \times 10^{-6} \times K^{1{,}231} \quad [21]$$

Cette équation diffère légèrement de celle qui a été établie par Cabibel et Do (1991) sur d'autres espèces et qui s'écrit :

$$u = 137 \times 10^{-6} \times K^{1{,}300} \quad [22]$$

Les valeurs de flux mesurées par cette calibration sont jusqu'à 15% plus élevées que celles qui sont obtenues à partir de l'équation de Granier pour des valeurs de K allant jusqu'à 1. Le flux total (F, m s^{-1}) traversant le tronc est calculé à partir de u et de la section transversale du bois d'aubier S_c (m^2) à partir de **l'équation 23.** S_c est déterminée à partir de prélèvements de carottes de bois dans le tronc.

$$F = u \; S_C \quad [23]$$

Le calcul de la densité de flux de la sève, u, repose sur la détermination de la différence de température qui est crée entre les deux sondes, notée ΔT. La valeur maximale de cette différence que l'on note ΔT_{max} est généralement observée avant l'aube et représente le flux nul. Un flux nocturne ascendant peut être observé au cours de la restauration du stock hydrique de l'arbre suite à une irrigation apportée après une période prolongée de sécheresse ou après une journée de sirocco, il est important d'en tenir compte. Ce flux nocturne peut représenter selon Abid-Karray (2006) de 33 à 45% du flux journalier avec des valeurs allant de 15,6 à 18,9 litres dm^{-2} $jour^{-1}$. Des valeurs de flux hydrique nocturne variant de 5% à 17% ont pu être enregistrées pendant des périodes où l'occurrence du flux nocturne est très faible.

Afin de résoudre ces problèmes liés d'une part aux variations de ΔT_{max} et aux flux nocturnes d'autre part, Granier (1985) propose de déterminer d'abord ΔT_{max} sur une période de 10 jours, d'écarter ensuite les valeurs des flux nocturnes et de recalculer enfin la nouvelle valeur de ΔT.

5.3. Calcul du flux de la sève par la méthode de Do et Rocheteau (2002)

Le problème majeur de mesure du flux par la méthode de Granier (1985, 1987) est lié à l'influence du graduent naturel qui peut atteindre +1°C la nuit et -2°C le jour (Do et Rocheteau, 2002 a). Ce graduent engendre selon Do et al., (1998) une surestimation de ΔT_{max} qui peut atteindre 86% et même 100% au niveau du flux (Do et Rocheteau, 2002 a).

Différentes méthodes de correction ont été proposées (Cabibel et Do, 1991 ; Kostner et al., 1998). L'adoption d'un chauffage discontinu alternant des périodes de chauffage et de non chauffage avec différentes combinaisons de temps a montré que le signal obtenu notamment pour un cycle de 45 mn de non chauffage et 15 mn de chauffage est indépendant des graduents naturels thermiques (Do et Rocheteau, 2002 a). D'autres

combinaisons ont été testées en vue d'augmenter le nombre de mesures à l'heure.

Au cours d'un cycle de chauffage / non chauffage (on / off), le signal alternatif obtenu ΔT_a est défini par l'écart entre ΔT_{on} et ΔT_{off} qui représentent respectivement la différence de température enregistrée à la fin de la période de chauffage et celle qui est mesurée à la fin de la période de non chauffage et qui est attribuée au flux naturel **(Equation 24).**

$$\Delta T_a = \Delta T_{on} - \Delta T_{off} \qquad [24]$$

L'indice du flux K est calculé à partir de ΔT_a et de ΔT_{max} par **l'équation 25** avec ΔT_{max} la différence maximale de température mesurée à flux nul et ΔT_a la différence de température du signal alterné mesurée à une certaine valeur de la densité du flux u.

$$K = (\Delta T_{max} - \Delta T_a) / \Delta T_a \qquad [25]$$

La calibration de cette méthode avec différenetes combinaisons de cycles de chauffage / non chauffage sur une colonne hydraulique artificielle remplie de sciure de bois a permis de définir une relation exponentielle **(Equations 26 et 27)** entre l'indice du flux (K) et la densité de flux u tel que :

$$K = 1 / (1+11{,}3\ u^{-1{,}414}) \qquad [26]$$

$$\text{où} \quad u = (11{,}3\ K\ /\ 1\text{-}K)^{0{,}707} \qquad [27]$$

La densité de flux u est exprimée en litre dm^{-2} $heure^{-1}$ et K un paramètre sans dimension.

6. Valeurs du flux de la sève brute chez l'olivier adulte et ses variations

6.1. Evolution du flux au cours de la journée

Les échanges d'eau qui ont lieu au cours de la journée sont étroitement liés à l'état hydrique de la plante et à la demande climatique.

A l'échelle de la journée, les valeurs de flux augmentent rapidement à partir de 7 h du matin, ensuite elles évoluent en suivant un plateau pendant environ 5 heures et diminuent à partir de 17 heures parallèlement à la diminution de la radiation solaire (Abid-Karray, 2006). Cependant des variations importantes peuvent être observées au cours de la même journée au sein de la même culture et du même arbre donnant des valeurs plus ou moins élevées du flux. Ces variations sont liées à des facteurs intrinsèques et extrinsèques notamment le type de capteur, sa position, le système de conduction de l'eau au niveau de l'arbre, la saison, l'humidité du sol et les conditions climatiques.

6.2. Variation du flux en fonction de la disponibilité en eau

Chez les arbres irrigués, les valeurs de flux augmentent rapidement dès les premières heures qui suivent l'apport de l'eau suite à une réhydratation des tissus vivants et élastiques (Granier, 1987) au niveau desquels Fernandez et Moreno (1999) ont rapporté une valeur maximale de 1,65 mm / jour. Cette valeur diminue rapidement à partir du 3ème jour de l'irrigation malgré la disponibilité de l'eau dans le sol. Chez l'olivier non irrigué le flux maximum enregistré est de 0,78 mm / jour et n'atteint jamais le niveau de transpiration des arbres irrigués même après irrigation. Au niveau du bois âgé, la réhydratation se fait plus lentement et la récupération de l'arbre est d'autant plus lente que la période de manque d'eau a été longue. Ce retard est lié à la forte résistance hydraulique des vaisseaux du xylème au flux hydrique. Les vaisseaux qui ont subit une cavitation ne peuvent être rempli à nouveau.

Les travaux de Moreno et al., (1988) entrepris au Sud de l'Espagne ont montré que la consommation de l'olivier Manzanille mesurée au niveau du tronc varie à l'âge adulte et sous irrigation de 35 à 39 litres jour^{-1} pour une surface foliaire de 21 m^2, correspond à un flux de 1,65 mm / jour. Au niveau des racines et des charpentes, les densités de flux maximales sont plus faibles. Chez le Kiwi, Green et Clothier (1998) ont trouvé des valeurs plus élevées en rapport avec un diamètre plus large du xylème.

Sur des oliviers de la variété Chemlali cultivés dans la Tunisie centrale soumis à une irrigation complémentaire estivale, Abid-Karray (2006) observe que la réponse de l'olivier, exprimée en terme de densité de flux varie selon le capteur. L'apport de l'eau génère dans la plupart des cas une augmentation du rapport des valeurs de la densité de flux entre deux capteurs qui est plus ou moins élevée selon leur orientation. Les valeurs obtenues au niveau des capteurs orientés Nord et Sud-ouest donnent un rapport de 1,42 avant l'apport de l'eau et de 2,22 après l'irrigation. Pour les directions Nord et Sud-est ce rapport demeure presque constant. Cette variabilité trouve son origine dans l'hétérogénéité du système de conduction de l'eau qui affecte la réponse du capteur. Les capteurs insérés au niveau des vaisseaux conducteurs peuvent être reliés au même vaisseau radiculaire ou à un vaisseau différent qui se trouverait soit dans la zone humectée par l'eau d'irrigation soit en dehors de celle-ci. De ce fait la réponse de ces capteurs à l'apport hydrique peut être différente. Par contre si ces deux capteurs sont reliés au même vaisseau radiculaire, la variation du rapport des densités de flux sera plus faible.

6.3. Variation du flux en fonction de l'emplacement du capteur

Granier (1987) observe sur le Douglas des variations azimutales du flux au cours des journées à forte demande climatique. Au contraire, une homogénéité des mesures du flux a été notée entre les orientations NO, NE et S pour les journées où cette demande a été faible.

Les travaux d'Abid-Karray (2006) ont révélé une variabilité importante entre les différents capteurs utilisés sur olivier Chemlali avec

des densités de flux maximales comprises entre 20 et 80 litres dm^{-2} $jour^{-1}$ selon le capteur. L'expression de ces densités pour chaque capteur par rapport à la moyenne des valeurs montre que certains de ces capteurs surestiment la densité de flux alors que d'autres la sous-estiment. Elle conclu dans une première étape que cette variabilité est liée à l'orientation du capteur.

Par la suite, l'analyse détaillée des données et la comparaison des différentes orientations a montré que le poids relatif d'une direction donnée diffère selon les arbres et que la répartition directionnelle de la densité du flux est plutôt aléatoire et peut être due à la variabilité de la conductivité de la sève dans la section du tronc. Cette hypothèse a été vérifiée grâce aux résultats de coupes réalisées sur différentes sections de rameaux après leur coloration à la Safranine Orange., colorant spécifique des tissus conducteurs. Sur ces coupes une variabilité de l'intensité de la coloration a été observée, témoignant de l'hétérogénéité du tissu conducteur de la sève brute. Ces résultats corroborent ceux de Nicolas et al., (2005)-cités par Abid-Karray, (2006)- qui attribuent la similarité des valeurs de flux obtenues pour les orientations Nord et Sud à une uniformité de distribution des vaisseaux conducteurs.

Le flux de la sève varie également en fonction de la profondeur du xylème et de l'emplacement du capteur (Granier, 1987), en outre le flux mesuré à la base de la couronne au cours de la matinée est plus élevé que celui qui circule en bas du tronc. Ces variations confirment davantage l'existence d'une hétérogénéité des transferts de l'eau dans le bois. La sectorisation des échanges hydriques permet d'expliquer en partie cette hétérogénéité. Dans les cas les plus marqués un secteur déterminé communiquerait d'une part avec une portion de la couronne de l'arbre et d'autre part avec une racine ou un faisceau radiculaire (Connor et Fereres, 2005).

Compte tenue de cette variabilité et afin d'estimer le flux moyen sur olivier, Giorio et Giorio (2003) comparent le flux moyen mesuré dans une direction donnée au flux moyen calculé pour l'ensemble des capteurs. Nous avons adopté cette procédure pour comparer les orientations et les arbres sur lesquels nous avons entrepris nos mesures.

6.4. Variation du flux en fonction de la demande climatique

Chez l'olivier Kalamata, Giorio et D'Andria (2002) ont trouvé une étroite corrélation entre l'évapotranspiration de référence (ET_o) et la transpiration. Pour une ET_o de 5 mm / jour, ils obtiennent une consommation de 9 et 22 litres / arbre / jour pour de jeunes oliviers de 7 ans cultivés respectivement en pluvial et en irrigué. Ces valeurs correspondantes à une consommation en verger de 0,5 et 1,2 mm/jour sont sous estimées par rapport à celles qui sont obtenues en adoptant une valeur de l'évapotranspiration de la culture de 0,36 ET_o (1,8 mm/jour) (Cohen et al., 2001).

Ces résultats concordent avec ceux de Granier et al., (1996), Moneno et al., (1996) et Cabibel et Isbérie (1997) qui ont observé une bonne corrélation entre les mesures directes de la transpiration et les valeurs déterminées par l'équation de Penman-Monteith (PM). Chez les arbres non irrigués, un écart entre ces valeurs est observé dès les premières heures matinales (9-10 h). Il est d'autant plus élevé qu'on avance dans la journée. Le maximum de flux mesuré au niveau du tronc est observé vers 16 h. Le pic mesuré au niveau de la racine a été observé à 15 heures.

Des travaux similaires entrepris par Cabibel et Do (1991) sur pommier ont montré que le flux de sève mesuré au niveau du tronc d'arbres irrigués est synchrone à la demande climatique alors que le flux radiculaire dépend de l'état d'humectation des racines. Les racines se trouvant dans le bulbe humide ont des cinétiques de flux synchrones à celles du tronc, par contre celles qui sont localisées en dehors de ce bulbe présentent un pic retardé par rapport à celui de la demande climatique maximale. Cette réponse tardive serait liée soit à une humectation par diffusion d'un plus grand volume de sol atteignant plus tardivement les racines péribulbaires soit à une reconstitution des réserves hydriques de la racine s'opérant à la fin de la journée ou au cours de la nuit. Pour les pommiers non irrigués les flux mesurés au niveau des racines et du tronc sont non synchrones à la demande climatique. Le maximum est d'autant plus précoce et prononcé que la période de non irrigation a été longue et

que le sol, plus sec. Ce comportement peut être considéré comme témoin d'un stress hydrique ou d'une régulation stomatique.

Pour une demande climatique faible ou nulle, le flux de sève décroît et peut s'annuler. Les flux nocturnes sont présents lors d'une séquence de forte évapotranspiration journalière. Néanmoins, ils peuvent trouver leur origine dans la reconstitution des réserves en eau de la canopée et du tronc qui ont contribué à la satisfaction de la demande évaporatoire diurne.

Cabibel et Do (1991) montrent que, bien que le flux de sève augmente avec la demande climatique, son intensité est d'autant moins proportionnelle à l'évapotranspiration que celle-ci devient grande. Les flux se stabilisent à un maximum ou diminuent dès que la contrainte climatique dépasse un seuil donné. Dans le cas du Pommier le flux n'a pas excédé 75% ET_o. Sous irrigation, les flux cumulés représentent au maximum 85% ET_o du fait que les arbres n'interceptent pas la totalité du rayonnement solaire qui arrive au niveau du verger. En sec, les flux peuvent atteindre 30% ET_o.

Les travaux de Mahjoub (2004) réalisés en Tunisie dans la région de Mornag durant l'année 2003 sur des oliviers Chétoui âgés de 6 ans, ont montré que le flux de sève mesuré au moyen de capteurs type INRA (construits selon le modèle de Granier) suit de manière générale la variation du rayonnement global (R_g) avec des fluctuations liées aux conditions climatiques. Pour trois journées-types choisies au cours de l'été, la réponse de l'arbre a été différente selon les conditions de chaque journée. Au cours d'une journée ensoleillée, le flux se stabilise au milieu de la journée alors que Rg continue à augmenter. Ce résultat concorde bien avec celui de Cabibel et Do (1991) sur pommier, montrant que des mécanismes de régulation internes sont mis en jeu en vue de limiter la consommation hydrique de l'arbre. En présence de sirocco, l'évolution du flux de la sève présente la même allure avec des valeurs de flux nettement plus élevées en dépit de valeurs de rayonnement global comparables. Cette augmentation est liée à l'effet advectif du sirocco. Au cours d'une journée pluvieuse d'été, le rayonnement global présente des fluctuations liées aux passages de nuages. Cependant il peut présenter

une course différée par rapport au rayonnement global qui serait attribuée au temps nécessaire pour l'évaporation de la pluie interceptée par le feuillage. La même étude a montré qu'à l'échelle du jour, des écarts importants sont observés entre le flux et $R_{g.}$ Pour expliquer ces divergences l'auteur s'est référé aux conclusions tirées à l'échelle horaire. En effet, si la variation de flux de sève horaire concorde en général avec celle de Rg, les proportions peuvent être influencées par d'autres facteurs climatiques par exemple le sirocco. D'autre part, des mécanismes de régulation interne interviennent lorsque la demande climatique devient trop élevée pour limiter la consommation hydrique de l'arbre.

Ces résultats concordent avec ceux de Abid-Karray (2006) qui observe que lorsque le rayonnement global est assez fort, la densité de flux de la sève en condition de bonne alimentation hydrique suit celle de R_g. Le maximum de cette densité, variant de 1,9 à 3,0 litres dm^{-2} h^{-1} est atteint pour des rayonnements globaux maximums variant de 94 à 223 Joules dm^{-2} h^{-1} et des valeurs de déficit de saturation de l'air allant de 1,48 à 0,44 KPa. En outre la baisse de la densité de flux vers 14 heures coïncide avec le maximum de déficit de saturation de l'air.

L'évapotranspiration de référence présente une meilleure relation avec le flux de sève quotidien car elle intègre l'influence de facteurs climatiques autres que le rayonnement global. Cependant, l'évolution de la densité du flux de sève en fonction de l'ET_o est liée en partie à la teneur en eau du sol (Cohen, 1991). Abid-Karray (2006) mesure sur olivier Chemlali âgé de sept ans et cultivé dans la région de Kairouan (semi-aride inférieur) des valeurs différentes de la densité du flux, de l'ordre de 2 et 3 litres dm^{-2} h^{-1} pour deux journées d'été caractérisées par une ET_o similaire mais correspondantes à des états hydriques différents avec une humidité du sol de l'ordre de 10% de la réserve utile pour la première journée et de 36% RU pour la seconde.

Des résultats comparables ont été obtenus par Mahjoub (2004) sur des oliviers Chétoui âgés de six ans et cultivés dans la région de Mornag (semi-aride supérieur). Pour une même valeur de ET_o, des valeurs de flux

différentes sont observées en raison de la variation de l'état hydrique du sol.

7. Transpiration de l'olivier

La hauteur de la lame d'eau transpirée par un arbre peut être exprimée soit en rapportant la densité du flux de la sève à la surface foliaire de l'arbre puis, l'extrapoler à l'ensemble du verger (Cienciela et al., 1999 -cités par Abid-Karray, 2006-) soit en la rapportant à la surface occupée par un arbre au niveau du verger ce qui consiste à extrapoler la surface conductrice à l'échelle de l'hectare (Do et Rocheteau, 2003). Le flux de la sève à l'échelle de l'arbre (F, litre / jour) ou transpiration moyenne de l'arbre est déterminé **(Equation 28)** en multipliant la valeur de la densité du flux de la sève (u, litre dm^{-2} $jour^{-1}$) par la surface conductrice correspondante (S_c, dm^2).

$$F = u * S_c \qquad [28]$$

La transpiration journalière de l'olivier à l'échelle de la parcelle est déterminée en calculant la moyenne arithmétique de ces flux en considérant l'ensemble des arbres **(Equation 29)** avec F_i le flux moyen par arbre (litre / jour) et n est le nombre d'arbres sur lesquels ont été faites les mesures de flux.

$$T_a = \Sigma F_i \; / \; n \qquad [29]$$

L'extrapolation de ces résultats à l'échelle de l'oliveraie permettant de calculer sa transpiration (T, mm) s'effectue **(Equation 30)** en divisant la valeur de T_a par la surface occupée par chaque olivier (S_o, m^2) tel que :

$$T = T_a / S_o \qquad [30]$$

Dans notre cas et pour un écartement de 6mX6m, S_o est de 36 m^2.

Le choix de la méthode de calcul de l'évapotranspiration de la culture dépend du travail à entreprendre, de la culture et de l'instrumentation disponible. Pour les cultures arboricoles plusieurs méthodes sont généralement combinées en raison de la discontinuité de la couverture du sol et de la répartition des racines. La technique de mesure du flux de la sève brute développée par Granier (1987) et modifiée par Do et Rocheteau (2002 a et 2002 b) nous a paru la plus adaptée à nos conditions pour estimer la transpiration à l'échelle de l'arbre qu'il est possible d'extrapoler par la suite à l'ensemble du verger. Mais s'agissant d'une culture à couverture discontinue du sol, qui nous place dans des conditions non standards, nous l'avons associée à d'autres méthodes d'estimation en l'occurrence celle du bilan hydrique et du bilan climatique afin de pouvoir déterminer les deux composantes de l'évapotranspiration de la culture.

CHAPITRE III

MODELES DE REPONSE A L'EAU

1. Définition

« Un modèle de croissance est une représentation simplifiée d'un processus complexe, qui intègre tous les mécanismes physiques, chimiques, biochimiques, biologiques…etc. » (Schwartz et al., 1997). Le modèle peut être physique ou abstrait. Il est représenté par une ou plusieurs équations. Une régression linéaire est un modèle.

Les relations microclimat - culture - production sont liées aux processus biologiques qui se produisent durant le cycle annuel de la culture et aux facteurs de l'environnement, notamment la température et l'eau. La compréhension de ces relations et la modélisation d'un événement permettent de définir les pratiques agronomiques nécessaires pour optimiser la production. Par exemple, les modèles phénologiques établis pour prédire la date de floraison chez le pêcher sont élaborés sur la base de la satisfaction des besoins en froid de la culture (Schwartz et al., 1997). Ils permettent d'indiquer le moment opportun d'intervention pour protéger la culture de l'effet du gel.

2. Types de modèles

2.1. Modèles statistiques

Les modèles statistiques décrivent les relations entre des variables sans tenir compte de leur signification biologique. Ils sont construits à partir de lois statistiques et sont utilisés généralement pour la prévision des rendements. La régression est utilisée pour exprimer une relation statistique entre une variable dépendante, en l'occurrence la croissance,

avec plusieurs variables indépendantes prévisionnelles à un moment donné (Schwartz et al., 1997). Dans le cas de la modélisation phénologique, ce temps est associé à un événement phénologique spécifique tel que la date de floraison, simulée en fonction de la somme des degrés jours. De tels événements varient en fonction de la localité et de l'année et ne dépendent que de la température.

En agronomie, l'outil le plus utilisé est la régression linéaire ou non linéaire, simple ou multiple. Ce modèle est simple dans sa nature et dépend dans une large mesure de la conception du modèle et de la répétitivité des données utilisées (Haffani, 1997).

'Le modèle de réponse à l'eau' est un modèle statistique (Dewit, 1958-cité par Haffani, 1997-) qui relie le rendement cumulé (Y) à la transpiration (T) cumulée. Il est exprimé par **l'équation 31.**

$$Y = K_c\, T / E_o \quad [31]$$

E_o représente l'évaporation d'une surface libre et (K_c) le coefficient cultural.

Riou (1993) exprime le rendement en matière sèche totale (Y) en fonction de la consommation en eau (ETR) par **l'équation 36** tel que **:**

$$Y = a\, ETR + b \quad [32]$$

L'expression de ce modèle par rapport à Y_{max} et ETM permet de comparer les résultats **(Equation 37).** Le modèle s'écrit:

$$Y / Y_{max} = [c\, ETR / ETM] + d \quad [33]$$

Le rendement maximal est supposé coïncider avec l'ETM.

Chez le Pacanier, Wright et al., (1990) expriment le nombre de bourgeons à fleurs (B) susceptibles d'évoluer en fruits en fonction de la circonférence du tronc (CT), du nombre de bourgeon par branche (Bb),

du coefficient de compétition entre les arbres (CC), du nombre de jours après débourrement (D) et du rendement (R). La régression linéaire (R^2 = 0,869) est exprimée par **l'équation 34** tel que :

$$lnB = 2{,}112+0{,}634\ lnBb + 0{,}00119\ CT - 0{,}0701\ lnCC + 0{,}00639\ D + 0{,}728\ R \quad [34]$$

Le modèle de Schwartz et Marotz (1986) exprime la date de floraison chez le Pêcher par une régression multiple **(Equation 35)** avec «date », le jour julien, B_i des coefficients et x_i les variables indépendantes :

$$1000/date = Bo + (B_1X_{i1}/date) + (B_2X_{i2}/ date)+\ldots+ (B_nX_{in}/ date) + e_i \quad [35]$$

Ce modèle peut être utilisé pour différents stades phénologiques.

Chez l'olivier, Ben Mechlia et Hamrouni (1978) montrent que la production d'une année n, (P_n) dépend de la production potentielle de l'arbre (P) et de celle de l'année qui précède. Ils expriment cette relation par une relation linéaire **(Equation 36)** en tenant compte de l'alternance de production et de la dose d'irrigation avec b: la pente de la régression.

$$P_n = P - b\ P_{(n-1)} \quad [36]$$

Le coefficient de régression est de 0,96. Les pentes des droites de régression correspondant aux doses de 400, 600 et 800 mm an^{-1} ont des valeurs qui tendent vers 1, ce qui se traduit par une accentuation du phénomène de l'alternance. Pour le traitement correspondant à 300 mm/an, la pente atteint 1,28 et l'alternance est atténuée.

2.2. Modèles semi – empiriques

Le modèle semi-empirique est intermédiaire entre le modèle statistique et le modèle de simulation. Il tient compte toutefois de la

physiologie de la plante. Comme exemples, nous citons les modèles théoriques de croissance.

La croissance, quelle soit exprimée en longueur, en surface ou en matière sèche (W) suit une courbe sigmoïdale, exponentielle ou parabolique (Blumenfield, 1980). Certaines phases de cette courbe sont même linéaires. Il est donc possible de les modéliser. Storey et Treeby (1999) rapportent un modèle expo - linéaire pour décrire la croissance des pommes et des Navels pendant le premier et le second stade de développement des fruits. Chez les Navels, la courbe montre deux phases linéaires de croissance séparées par une inflexion. Ces phases traduisent deux phénomènes biologiques : la division cellulaire (R^2 = 0,98) et l'élargissement des cellules (R^2 = 0,93). L'inflexion correspond à une phase de transition entre ces deux processus biologiques. Elle peut traduire également un changement dans l'équilibre de la balance des carbohydrates entre les organes sources et puits suite à une chute significative de fruits. La phase linéaire de la courbe correspond à un régime stationnaire pour tous les phénomènes impliqués dans la croissance. Le passage de cette phase à la phase concave traduit un ralentissement du phénomène décrit. La considération simultanée de phases accélérées et décélérées conduit à un modèle dit « logistique ». Les fonctions logistiques utilisées dans les modèles de croissance sont utiles car les paramètres utilisés ont une signification biologique, telle que les maxima et minima asymptotiques et les points d'inflexion, traduisant une vitesse de croissance maximale. Cette logistique est exprimée par **l'équation 37.**

$$W = W_{max} / (1 + e^{-RGR\,(1 - t\,1/2)}) \qquad [37]-$$

$t_{1/2}$ représente le temps au bout duquel, la masse (W) atteint la moitié de sa valeur maximale (W_{max}). RGR est la vitesse de croissance relative.

Les phénomènes physiologiques peuvent être illustrés par des fonctions asymétriques telle que la fonction de Gompertz **(Equation 38)** (Stanley et al., 2000). Elle s'écrit :

$$dW / dt = \mu_o \times W e^{-st} \quad [38]$$

avec μo le taux de croissance spécifique à t = 0, W est la matière sèche et S est le paramètre de sénescence.

Stanley et al., (2000) ont corrélé la croissance des pommes à la température moyenne et à la somme des degrés jours $GDD_{10°C}$. Le modèle de prévision obtenu a montré que la prévision de la croissance en relation avec $GDD_{10°C}$ est d'autant plus faible que l'intervalle de prévision est important. Les meilleures corrélations entre le poids des fruits et $GDD_{10°C}$ sont obtenues entre le trentième et le cinquantième jour après la pleine floraison, avec un coefficient de variation allant de 71 à 96%. Dans ce modèle, la croissance des pommes est exprimée en fonction des changements saisonniers par **l'équation 39**.

$$Y = c \exp(\exp b) / \exp[\exp(b - k * DAPF)] \quad [39]$$

Avec Y, le poids moyen du fruit, (c, b et k) les paramètres de Gompertz, c est la mesure du poids initial et DAPF est la date après la pleine floraison. Ce modèle est amélioré lorsque la croissance des fruits est exprimée en fonction des températures moyennes de chaque intervalle de prévision.

2.3 Modèles de simulation

Les modèles de simulation sont des modèles complexes intégrant des réactions intrinsèques liées à la culture, les facteurs environnementaux et leurs interactions. Dans de tels modèles les changements d'états sont décrits par des équations mathématiques mettant en évidence les facteurs limitants de la croissance. Ils sont

organisés le plus souvent en quatre modules : un module phénologique, un module de production de biomasse, un module de répartition et de redistribution et un modèle de contrainte. Parmi ces modèles on peut citer le modèle « DART » (Demarez et al., 2000) qui simule l'effet de l'architecture de la couverture du sol et des effets de bords sur les transferts radiatifs et l'activité photosynthétique d'un milieu fini. Ce modèle est exprimé en fonction du LAI et de la radiation PAR.

B - APPROCHE METHODOLOGIQUE

CHAPITRE I

PARAMETRISATION ET SUIVIS

1. Suivi de l'état hydrique du sol

1.1. Humidité volumique

L'état hydrique du sol a été suivi durant la campagne 2003 à partir de mesures neutroniques (sonde à neutrons modèle SOLO 25) qui ont démarré au mois d'avril 2003 au moment de la floraison. Pour couvrir tous les états hydriques du sol nous avons réalisé des mesures très rapprochées au cours de la saison d'irrigation et poursuivi les mesures jusqu'au mois de décembre 2003.

Les mesures neutroniques ont été réalisées au moyen de tubes en PVC que nous avons fabriqué nous même. Ces tubes ont été implantés autour de trois oliviers Chétoui du premier bloc. Les emplacements des tubes ont été choisis compte tenu de l'hétérogénéité de la couverture du sol et de la répartition des racines, de manière à pouvoir couvrir l'ensemble de la zone exploitable par les racines de l'olivier, celle qui est sujette à l'humectation par l'irrigation et celle qui est exposée à l'évaporation directe du sol.

Les mesures neutroniques ont été réalisées entre les profondeurs 20 et 120 cm avec un pas de 20 cm. Le principe consiste à déterminer la valeur (N) du comptage affichée au niveau du compteur de la sonde est rapportée à la mesure moyenne de référence (N_{eau}) qui est réalisée dans

l'eau avant et après chaque série d'observations pour corriger le phénomène de dérive électronique. L'humidité volumique correspondante est déterminée pour chaque profondeur et pour chaque tube à partir de la courbe d'étalonnage de la sonde.

Cette technique nécessite l'étalonnage de la sonde. La courbe d'étalonnage exprime l'humidité volumique (Hv, %) en fonction du rapport N* égal à N / N_{eau} correspondant. Les valeurs de Hv sont déterminées par gravimétrie à partir d'échantillons de sol prélevés à la tarière le même jour que les mesures neutroniques et à des endroits comparables à ceux des tubes d'accès. La courbe est construite pour chaque horizon. Les prélèvements gravimétriques ont été effectués avec un pas de 20 cm jusqu'à la profondeur 120 cm. En surface (0-20 cm) ces mesures ont été plus fréquentes étant donné que les valeurs mesurées à la sonde sont erronées. L'humidité volumique est donnée par les **équations 2 et 3.**

$$H_v \% = D_a * H_m (\%) \quad [2] \quad \text{avec} \quad H_m (\%) = (P_f + T) - (P_s + T) / (P_s - T) * 100 \quad [3]$$

Avec P_f et P_s les poids frais et sec de l'échantillon (g)

T : la tare (g),

H_{m} et H_v : humidités massique (%) et volumique (%),

D_a : la densité apparente (g / cm^3).

1.2. Stock d'eau

Le stock d'eau est déterminé pour chaque tranche de sol et pour l'ensemble du profil. Pour une tranche de sol profonde de 0,20 m, le stock d'eau donné en mm est égal à deux fois la valeur de l'humidité volumique exprimée en pourcentage.

2. Caractérisation du matériel végétal

Les mesures de la circonférence de la frondaison ont été effectuées sur trois arbres par variété et par bloc (12 arbres/variété avec 4

répétitions) sur des oliviers choisis au niveau de la partie centrale de chaque unité parcellaire et en dehors des lignes de bordure. La surface de la canopée a été déduite de ces suivis ainsi que le taux de couverture du sol qui a servi dans la détermination des besoins en eau de la culture.

Le système radiculaire a été étudié sur des arbres âgés de 1 à 6 ans selon la méthode de la tranchée (Fernandez et Moreno, 1999) à partir de profils pédologiques creusés à 40 cm du tronc (orientation Nord-Ouest) sur une profondeur allant de 1,0 à 1,2 m selon l'âge. Une représentation schématique de la distribution des racines émergentes du côté Est de la tranchée a été réalisée pour chaque arbre en indiquant pour chaque tranche de sol le nombre de racines observé et le diamètre moyen de ces racines. La surface radiculaire a été déterminée à partir de ces suivis.

3. Mesure du flux de la sève brute

3.1. Fabrication des capteurs 'Granier' et acquisition des capteurs 'Dynamax'

L'expérimentation a démarré dès la fin de l'année 2002 par la fabrication au Laboratoire de Bioclimatologie de l'INAT de capteurs 'Granier' de mesure du flux de la sève selon la technique décrite par Mahjoub (2004) et Abid-Karray (2006).

Au début du mois de mars 2003, nous avons procédé à l'installation des capteurs en plein champ sur trois oliviers de la variété Chétoui. Nous avons utilisé dix capteurs de flux dont trois ont été construits au laboratoire **(Photo 1)** et que nous appellerons 'INRA-France' et sept autres de la marque 'Dynamax' construits selon le même principe et que nous avons acquis dans le cadre de nos activités de recherche. Les deux modèles de capteurs diffèrent par leur longueur et leur puissance de chauffage.

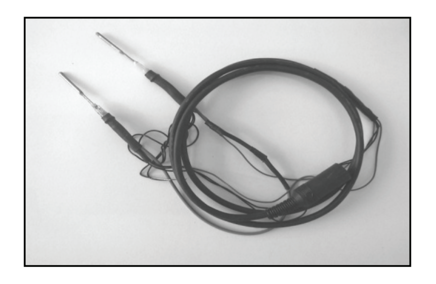


Photo 1. Capteur de flux de sève fabriqué au laboratoire selon la méthode de Granier. Le capteur est constitué de deux sondes, l'une servant de référence, l'autre portant une sonde chauffante (fil rouge).

3.2. Installation des capteurs en plein champ

Le dispositif de mesure du flux de sève est constitué principalement d'un ensemble de capteurs thermiques (10) que nous avons inséré à 2,5 cm sous l'écorce du tronc des trois oliviers Chétoui à 40 cm au dessus du niveau du sol selon les orientations SE, SO et NE **(Photo 2).** Ils ont été reliés à la centrale d'acquisition des données (data logger) type DL2 afin d'enregistrer les signaux émis par ces capteurs (Masmoudi et al., 2004). La centrale est branchée à une batterie (12V, 20 mA) qui assure son alimentation en courant. La batterie est reliée à un panneau solaire qui permet sa recharge au cours de la journée. Néanmoins nous procédons à son changement tous les 10 jours en hiver et tous les 20 jours en été afin d'éviter son épuisement. Au laboratoire, elle est contrôlée et rechargée pendant cette période 'de repos'.

Le capteur est constitué de deux sondes formée chacune d'un thermocouple Cuivre – Constantin (Mahjoub, 2004 ; Masmoudi et al., 2004). La sonde aval (placée en haut du tronc) est équipée d'un élément chauffant dont la chaleur diffuse à travers le bois et la sève par le passage de la sève induisant une différence de température entre la sonde de référence (placée en bas du tronc à l'arrivée de la sève) et la sonde chauffante. Nous avons adopté un cycle de chauffage de 30 minutes de chauffage/30 minutes de non - chauffage pour tenir compte du l'effet du

graduant naturel. Celui-ci peut en effet être important notamment au cours des journées de forte demande évaporatoire.



Photo 2. (a) Capteurs de mesure du flux de la sève xylémique installés sous l'écorce du tronc d'olivier « Chétoui » âgé de six ans. Les deux sondes du capteur sont décalées l'une par rapport à l'autre pour éviter les interférences. La sonde aval (haut) est munie d'un élément chauffant. (b) Les capteurs sont enveloppés par un film en aluminium.

3.3. Procédure de calcul

Les capteurs fournissent chacun six mesures par demi-heure (6 mesures pour la période de chauffage et 6 autres pour la période de non chauffage), produites sous forme d'une différence de température. Le calcul de la densité de flux se fait selon la procédure de Do et Rocheteau (2002). Dans une première étape la valeur maximale de ces différences (ΔT_{max}) est déterminée. Elle correspond au flux nul. Une correction des mesures est ensuite effectuée en calculant la différence notée $\Delta T_a = \Delta T_{on} - \Delta T_{off}$ où ΔT_{on} représente la différence de température à la fin de la période de chauffage (demi-heure de chauffage) et ΔT_{off} celle mesurée à la fin de la période de non chauffage (demi-heure de non chauffage). A partir de ces valeurs corrigées l'indice du flux K tel que $K = (\Delta T_{max} - \Delta T_a) / \Delta T_a$ est calculé. Une valeur de la densité de flux de sève (u) est donnée en litre dm^{-2} h^{-1}. La valeur F du flux de la sève (litre/jour) est

déterminée en multipliant (u) par la section du rameau conductrice de l'eau. Pour déterminer cette dernière, il a été nécessaire de mettre au point la technique de coloration du bois, de coupe des rameaux et de calcul de cette surface puisque les méthodes conventionnelles de coloration au carmino - vert et de coupe dans les inclusions de paraffine ou à main levée ne sont pas adaptées aux rameaux de grand diamètre.

4. Analyse des résultats

L'étude de la dynamique de croissance des jeunes oliviers est intégrée dans le cadre de l'étude de la relation sol - plante en vue de caractériser la croissance de l'arbre compte tenu des conditions environnementales et particulièrement hydriques. Pour cela, nous avons entrepris au cours de la campagne 2003, le suivi de l'état hydrique du sol à partir de mesures gravimétriques et neutroniques. Pour analyser les données obtenues, nous avons calculé les stocks d'eau en considérant différents compartiments du sol afin de tenir compte de l'effet de l'hétérogénéité de la dynamique de l'eau dans le réservoir sol qui résulte de la couverture discontinue du sol et de la répartition hétérogène des racines. Cette analyse a été réalisée en considérant deux échelles. Nous avons entrepris dans un premier temps pour différentes dates de mesures correspondantes à différents stades phénologiques, une analyse quantitative de la répartition spatiale des stocks d'eau dans les différents compartiments du réservoir sol en considérant les zones humectées par l'irrigation, celles qui sont sujettes à l'évaporation et celles qui sont sous l'effet de la transpiration du jeune arbre. Dans une seconde étape, nous avons analysé l'évolution des stocks d'eau à travers tout le cycle de croissance et analysé ses variations.

Mais en raison de l'hétérogénéité de la couverture du sol et de la répartition des racines, l'évapotranspiration déterminée à partir du bilan hydrique ne reflète pas la part qui est attribuée à l'arbre c'est- à – dire la transpiration. Pour cela nous avons mesuré au cours de la même campagne le flux de la sève brute en vue de déterminer la contribution de la composante transpiration dans l'évapotranspiration du jeune olivier.

L’analyse du flux a été également réalisée en considérant des journées types, retenues au niveau des différentes saisons pour diverses conditions hydriques et climatiques.

Enfin pour intégrer l’ensemble des résultats, nous avons développé un modèle de calcul des besoins en eau des jeunes oliviers dans lequel nous avons mis en relation les paramètres climatiques, le développement de la frondaison et du système radiculaire.

C - RESULTATS

CHAPITRE I

ANALYSE DES CONDITIONS DE L'ESSAI

1. Mesure de l'humidité volumique du sol

L'humidité du sol a été déterminée par des mesures neutroniques et gravimétriques. Les mesures à la sonde à neutrons ont été réalisées aux moyens de tubes d'accès en PVC qui ont été placés à différentes distances du tronc.

1.1. Confection des tubes d'accès de la sonde à neutrons

Les mesures neutroniques sont faites au moyen de tubes d'accès longs de 170 cm et confectionnés en PVC avec une extrémité conique en polyamide. Leur étanchéité a été assurée par une colle spéciale à base de polyurythane utilisée à doubles fins (collage et étanchéité). Les tubes sont implantés autour de trois pieds d'olivier « Chétoui » de manière à couvrir le volume de sol exploitable par les racines.

1.2. Choix de l'emplacement des tubes d'accès de la sonde à neutrons

Les tubes d'accès de la sonde à neutrons ont été installés au début de l'année 2003 à différentes distances du tronc de trois oliviers Chétoui choisis de vigueur comparable dans le premier bloc de la parcelle. Ils ont été implantés dans des trous creusés à la tarière en veillant à ce qu'ils

soient bien adhérents à la terre qui les entoure. L'air se trouvant pris entre le tube et la terre peut en effet fausser la mesure neutronique.

L'emplacement des tubes a été choisi de manière à tenir compte de la variabilité de l'état hydrique des différents compartiments du sol qui résulte de l'hétérogénéité spatiale de la culture, de la répartition hétérogène de ses racines, de la couverture incomplète du sol par la frondaison et de l'humectation de la zone soumise à l'irrigation.

La **figure 1** montre la distribution des différents tubes qui sont placés aux quatre points cardinaux de chaque olivier, sur la ligne entre deux arbres, dans la zone située en dehors de la frondaison et au centre du carré formé par quatre arbres. Les tubes placés sous les arbres et sur la ligne entre deux oliviers sont représentés par trois et deux répétitions respectivement. En dehors de ces zones, les tubes sont placés de manière à ce qu'ils soient en symétrie les uns par rapport au autres et par rapport à la ligne qui passe par les emplacements 9,10 et 11, situés à environ 3m du tronc et orientés EO Le tube 9 représente la zone soumise à l'effet de la pluie et à l'évaporation du sol.

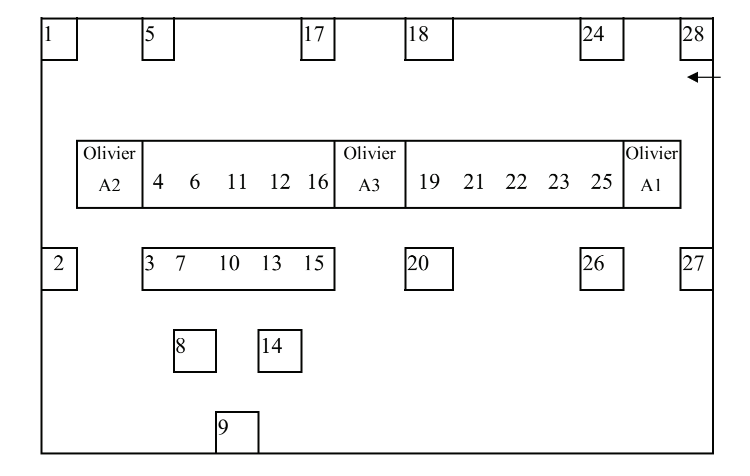


Figure 1. Distribution des tubes d'accès de la sonde à neutrons (28 tubes). Les tubes sont placés à 150 cm de profondeur autour de trois oliviers Chétoui choisis dans le premier bloc de la parcelle. Ils sont placés sous la frondaison des arbres au niveau des quatre coins cardinaux, sur la ligne entre deux oliviers et en dehors de la frondaison de manière à couvrir l'ensemble de la zone radiculaire. Le tube n°9 est placé au centre du carré formé par quatre oliviers et représente la zone soumise à la pluie et à l'évaporation du sol.

Le stock d'eau dans le sol a été estimé à partir des mesures de l'humidité volumique déterminées à différentes distances du tronc **(figure 1)** sur une profondeur de 120 cm avec un pas de 20 cm. Pour une profondeur de 0,2 m, le stock d'eau est égal à deux fois la valeur de l'humidité volumique exprimée en pourcentage.

Afin de pouvoir étudier l'évolution du stock d'eau dans le réservoir sol, les tubes ont été organisés en différents groupes selon leur distance au tronc **(Tableau 1).**

Tableau 1. Répartition des tubes d'accès de la sonde neutronique en fonction de la distance au tronc.

Groupe	Position
Groupe 1 : Aplomb de la frondaison (1,4 m)	1-17-24-5-18-28
Groupe 1 : Point d'intersection des bulbes des 2 goutteurs (1m)	2-15-26-3-20-27
	4 -19-16-25
Groupe 2 : limite de la zone des racines (2m) mais non couverte	6-21
	12-23
Groupe 3 : Zone se trouvant en dehors des racines	7-8-10-13 et 14
	11-22
Groupe 4 : Point d'intersection de 4 oliviers (4m)	9

Le groupe 1 est représenté par les mesures effectuées dans un rayon de 1,4 m du tronc (à l'intérieur et à l'aplomb de la frondaison).Ces sites sont soumis à l'effet de la pluie, de l'irrigation et de l'évapotranspiration de la culture. Le groupe 2 correspond aux points de mesures situés à 2m du tronc (limite de la zone des racines). Le groupe 3 représente les points de mesures situés entre 2,2 et 2,8 m du tronc, c'est - à - dire en dehors de l'aplomb de la frondaison et jusqu'à la mi-distance entre deux oliviers. Enfin le groupe 4 est représenté par la mesure effectuée au centre du

carré formé par quatre oliviers et sujette à l'évaporation directe du sol et recevant uniquement les apports d'eau de pluie.

L'évolution du stock d'eau est étudiée pour chacun de ces groupes séparément à l'échelle de l'année puis en considérant des journées types. Pour chacune de ces journées nous avons comparé l'évolution de l'humidité du sol au niveau de la tranche 0-120 cm pour les quatre groupes.



Photo 1. Le système d'irrigation goutte à goutte est constitué de deux rampes d'irrigation placées de part et d'autre de la ligne d'olivier à 50 cm du tronc. Chaque rampe est munie d'un compteur d'eau pour estimer les quantités réellement reçues. Les tubes d'accès de la sonde à neutrons pour la mesure de l'humidité du sol sont placés au sein de la zone humectée par l'irrigation. Chaque plant est entouré par cinq tubes enterrés à la profondeur de 150 cm.

1.3. Le bilan hydrique

Le bilan hydrique a été établit pour chacun des quatre groupes en utilisant son équation simplifiée et en considérant les mesures effectuées sur l'ensemble du profil du sol jusqu'à 120 cm. Mais en raison de sa variabilité nous nous sommes limités à l'analyse de sa variation dans chaque compartiment du sol.

2. Mise en place de l'olivette et conduite de la culture

Les travaux d'installation ont démarré au cours de l'automne 1997 par un labour superficiel de nettoyage et l'épandage intégral des engrais phospho - potassiques (200 kg / ha de Sulfate de potasse et 200 kg / ha de Super phosphate 45%) (Institut de l'Olivier 1994 ; Masmoudi-Charfi, 2006 ; Masmoudi-Charfi et al., 2006). Un labour profond à la charrue à socs a permis leur enfouissement à une profondeur de 40 cm. Au moment de la plantation chaque plant a reçu 20 kg de fumier de bovin mûr. L'ammonitrate a été apporté annuellement en deux fractions les 2/3 en février-mars et le 1/3 en octobre. Les labours d'entretien (3/an), ont été effectués au cover crop à la fin de l'hiver, au courant de l'été et à l'entrée de l'automne. Ils ont été associés à des binages manuels entrepris autour des troncs. Durant les deux premières années de culture un élagage de la base du tronc a été effectué sur une hauteur de 25 cm afin de permettre le développement d'un tronc rectiligne et sans ramifications. La taille de formation, pratiquée au mois de février, a été effectuée durant 3 consécutives à partir de l'année 2000. Les oliviers ont été formés sur un tronc unique et taillés en gobelet avec trois ou quatre charpentes. Pour le besoin de l'expérimentation, l'axe central ou principal qui constitue la première charpente de l'arbre n'a pas été coupé durant les six premières années de culture. Les ramifications de la frondaison ont été éclaircies ou pincées selon leur destinée. Des insecticides systémiques ont été utilisés au besoin et à titre curatif uniquement contre la Psylle et la mouche de l'olivier au printemps et en automne respectivement. Un traitement fongique utilisant un produit à base de cuivre a été appliqué en 2002 et en 2003 contre *l'œil de paon* qui a occasionné une chute importante des feuilles.

Compte tenue des quantités de pluie annuelles enregistrées dans la région au cours des 20 dernières années (450 mm), nous avons pratiqué une irrigation complémentaire de mars à septembre en vue de combler le déficit climatique enregistré. Cependant, la variabilité des précipitations d'une campagne à l'autre, les pannes techniques survenues et relatives au système de pompage de l'eau (rupture de vanes et de conduites

principales, foudroyement du groupe d'éléctricité en 1999, baisse du niveau de la nappe d'eau durant la campagne 2002) ont fait que le niveau de satisfaction des besoins en eau a varié selon l'année et au sein de celle-ci. A partir du mois de mars 1998 les mesures de croissance ont démarré.

3. Mesure du flux de la sève brute

Les mesures de flux ont été réalisées sur l'olivier Chétoui, prise comme variété de référence, en utilisant deux modèles de capteurs, qui sont caractérisés par une taille et une puissance de chauffage différentes. Pour pouvoir adapter les résultats produits par ces capteurs à nos conditions, nous avons procédé à leur calibrage et à la détermination de la section du rameau conductrice de l'eau. Ces manipulations ont été réalisées au laboratoire de bioclimatologie de l'INAT au cours de l'année 2004.

3.1. Calibrage des capteurs

L'étalonnage des capteurs consiste à établir une relation entre la densité de flux et l'indice de flux pour différentes pressions de l'eau et puissances de chauffage. Pour cela nous avons monté un dispositif d'étalonnage **(Photo 2)** au laboratoire de Bioclimatologie de l'I.N.A.T. dont le principe consiste à faire passer de l'eau sous pression au niveau d'une portion de branche de diamètre compris entre 1 et 7 cm et de déterminer d'une part le poids de l'eau qui s'y écoule et d'autre part la mesure du signal correspondant, convertie en densité de flux.

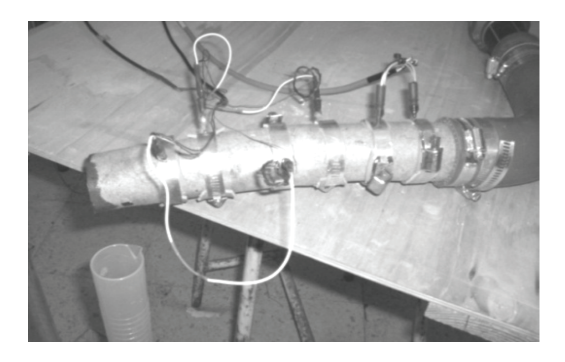


Photo 2. Dispositif d'étalonnage des capteurs de mesure du flux de la sève. Les capteurs thermiques sont insérés sous l'écorce du rameau et sont reliés à une centrale d'acquisition des données et à l'électronique nécessaire pour le fonctionnement intermittent du chauffage. L'eau, javellisée et mise sous pression dans une citerne en aluminium, passe à travers le rameau puis elle est récupérée dans une éprouvette graduée et pesée. Une mesure simultanée du signal du flux de la sève est donnée.

Pour chaque puissance de chauffage (P) utilisée, une relation linéaire est trouvée entre la densité de flux de sève (Fd) et l'index de flux (K). Les mesures de densité de flux sont corrigées en utilisant l'équation de calibrage qui correspond à la puissance du capteur correspondant, comme le montre la figure suivante.

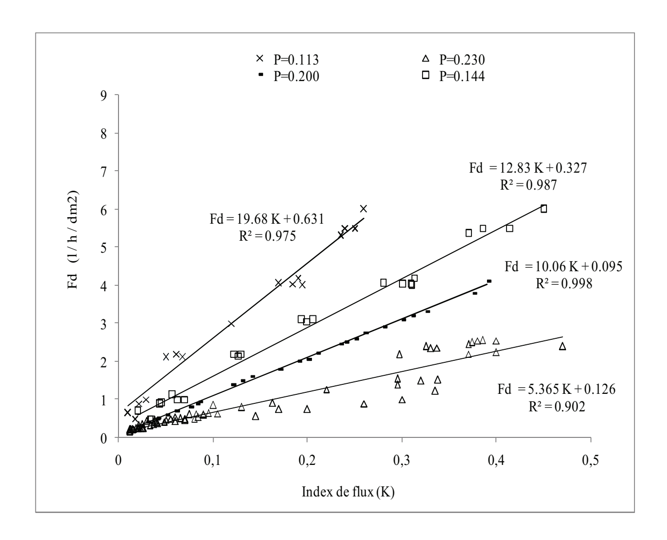


Figure 2. Relations entre la densité de flux de sève ($l/h/cm^2$) et l'index de flux (K) déterminées expérimentalement pour différentes puissances de chauffage (P, Watt) des capteurs.

3.2. Détermination de la section conductrice du bois

Le passage de la densité de flux au flux horaire nécessite la connaissance de la section conductrice de l'eau. Cette section a été déterminée au laboratoire en utilisant un colorant spécifique du bois conducteur, la Safranine Orange.

Des portions de bois frais de 10 cm de longueur et de diamètre variant de 1 à 7 cm ont été utilisées pour cette manipulation. L'extrémité amont du rameau est immergée dans une solution saturée de safranine alors que le côté aval est relié à une pompe à vide qui permet le passage de l'eau dans la potion de bois par aspiration, simulant l'appel de transpiration. Les observations sont faites à l'œil nu sur des rondelles de bois finement et fraîchement coupées.

Au niveau des coupes **(Photo 3)** une hétérogénéité de la coloration est observée. Elle est due à la présence de différentes structures mais elle peut être liée à une mauvaise coloration. En effet, si le temps de trempage

n'est pas suffisant, le colorant sera mal réparti et des taches blanches apparaîtront au niveau du bois conducteur. Sur des coupes correctement colorées, la moelle apparaît en blanc alors que le bois conducteur est coloré en rouge sang. L'écorce conserve sa couleur verte.



Photo 3. Dispositif expérimental conçu pour la détermination de la section du bois conducteur. La solution saturée de safranine est absorbée par aspiration au moyen d'une pompe à vide durant une période donnée et colore le bois conducteur de la sève.

Les différentes sections colorées ont été photographiées puis visualisées sur un écran en vue de l'analyse. A partir de ces photographies, la surface totale de la portion du rameau ainsi que celles des différentes zones colorées au niveau de chaque section ont été déterminées au moyen du *logiciel Arcview.* Sur la base des données obtenues, nous avons établi une relation entre le périmètre du rameau et sa section conductrice de l'eau.

CHAPITRE II

ETAT HYDRIQUE DU SOL ET CONSOMMATION EN EAU DES JEUNES OLIVIERS

1. Caractérisation de l'état hydrique du sol

1.1. Introduction

La croissance de l'olivier a montré des variations inter annuelles importantes durant les six campagnes de mesures qui résultent en particulier de l'effet combiné du climat et de l'eau. Cependant, la satisfaction des besoins en eau que ce soit à l'échelle de l'année ou de la période estivale -durant laquelle se font simultanément la croissance des olives, des pousses, des racines et l'induction des nouveaux bourgeons à fleurs- ne conduit pas nécessairement à une croissance importante et / ou à un niveau de production élevé. En outre, certains stades phénologiques sont plus sensibles que d'autres au déficit hydrique. Donc un déficit hydrique temporaire peut conduire à une réduction de la croissance ou à une baisse du rendement ou les deux à la fois même si les besoins en eau à l'échelle de l'année sont couverts. Pour quantifier la consommation en eau des jeunes arbres, nous avons combiné différentes méthodes de mesures du fait qu'il s'agit d'une jeune culture arboricole caractérisée par une couverture partielle du sol et un développement hétérogène des racines. L'évolution du stock d'eau au cours de l'année 2003 a été étudiée au niveau des différents compartiments du réservoir sol en vue de déterminer l'évapotranspiration réelle de l'olivier (à travers le bilan hydrique), qui a été par ailleurs estimée à partir de la méthode de la FAO (Allen et al., 1998). D'autre part nous avons procédé au cours de la même campagne à la mesure du flux de la sève brute pour déterminer la

transpiration du jeune olivier. Dans une première étape nous avons mis au point la technique de mesure et installé le dispositif expérimental (capteurs thermiques) sur l'olivier *Chétoui*. La méthode utilisée est celle de Granier (1985, 1987) modifiée par Do et Rocheteau (2002 a et 2002 b). Les résultats obtenus ont été ensuite utilisés pour analyser l'évolution du flux ou de la densité de flux en fonction des conditions de culture. Ainsi, des journées-type ont été choisies caractérisées par des conditions climatiques et hydriques différentes à travers toute la campagne de mesures. La relation entre la transpiration du jeune olivier et la demande climatique a été investiguée. Les résultats sont présentés et analysés dans ce qui suit.

1.2. Consommation et besoin en eau des jeunes oliviers

Dans les vergers arboricoles et plus particulièrement dans les jeunes plantations d'olivier, la discontinuité de la couverture du sol engendre une variabilité de l'interception du rayonnement solaire et affecte le rapport transpiration de la culture/évaporation du sol. Ceci rend difficile l'estimation des besoins en eau de la culture. Le volume de la frondaison des oliviers et donc de la surface transpirante varie dans le temps. En effet, le volume de la frondaison des jeunes arbres augmente sensiblement pendant les premières années succédant à la plantation. Elle est réduite ponctuellement par la taille.

L'estimation de l'ET_c par la méthode recommandée par la FAO en utilisant l'ET_o et les coefficients culturaux est largement utilisée en oléiculture. Cependant, il est nécessaire d'adopter une valeur du coefficient cultural adaptée à l'âge de l'arbre. La variation des valeurs de K_c traduit en effet la variation de l'activité de la plante et celle de l'état hydrique du sol en surface. Durant les mois du printemps et de l'automne, les vagues de croissance végétative et la fréquence élevée de l'humectation du sol par les pluies se traduisent par des valeurs élevées de K_c. En période estivale, les faibles valeurs de K_c sont le résultat du ralentissement de l'activité physiologique de la plante et de la diminution des évènements pluvieux. Pour de jeunes oliviers âgés de moins de six

ans, Le Bourdelles (1977) recommande l'utilisation de la valeur 0,3 pendant les deux premières années après plantation, la valeur de 0,4 pour les trois années suivantes et à partir de la cinquième année, la valeur de 0,5. Nous avons adopté ces valeurs pour calculer l'ET_c de nos jeunes oliviers.

Tableau 2. Valeurs de l'ET_c (mm) calculées à l'échelle de l'année et au cours de la période d'irrigation de mars à septembre.

	1998	1999	2000	2001	2002	2003
ETc = ET_o x K_c x K_r (mm/an)	276	277	361	359	344	454
ETc mars-septembre = ET_o mars-septembre x K_c x K_r (mm)	243	241	291	287	273	368

Afin de tenir compte des variations du pourcentage de couverture du sol liées à la densité de plantation, l'utilisation d'un facteur de correction (K_r) est proposée (C.O.I., 1997). Les valeurs de Kr à utiliser dépendent du pourcentage de couverture du sol par la végétation (C.O.I., 1997). Celui-ci est déterminé à partir de la mesure de la circonférence de la frondaison rapportée à la surface utile d'un olivier. Dans notre cas la surface utile d'un olivier est de 36 m^2. Pour de jeunes oliviers couvrant moins de 30% du sol, la valeur de K_r est de 0,7. Pour une couverture de sol comprise entre 30 et 40%, on prend K_r = 0,75. Les besoins en eau de la culture $ET_c = ET_o \times K_c \times K_r$ **(Tableau 2)** ont été calculés en adoptant les valeurs annuelles de l'ET_o – PM déterminée pour la région et les valeurs de K_c et de K_r ci-dessus indiquées.

Pendant la période d'expérimentation, les besoins en eau des jeunes oliviers ont varié de 276 à 454 mm à l'échelle annuelle et de 243 à 368 mm durant la période allant de mars à septembre. L'augmentation de ces besoins d'une année à l'autre résulte de l'augmentation du volume de la

frondaison et de l'âge. La surface moyenne du sol couverte par la végétation est en effet passée de 0,6% en 1998 à 31% en 2003 ce qui nous a conduit à choisir des valeurs de K_r de 0,70 pour les cinq premières années et de 0,75 pour la 6ème année en rapport avec le pourcentage de couverture du sol qui a dépassé 25%. Quant à la valeur de K_c, celle-ci a été de 0,3 pour les deux premières années d'âge, de 0,4 pour de la 3ème à la 5ème année et de 0,5 pour la 6ème année.

1.3. Conduite de l'irrigation

Compte tenu des conditions climatiques de la région d'étude qui ont sévi au cours de ces dernières vingt années et des conditions annuelles, nous avons adopté une irrigation complémentaire, pratiquée sur une période de six mois. Elle est délenchée au printemps plus ou moins précocément selon les conditions de l'année et l'état hydrique du sol et se poursuit jusqu'à l'arrivée des premières pluies importantes de l'automne. L'irrigation a été pratiquée au moyen de cuvettes au cours des deux premières années de culture, au moyen de rigoles pour les deux années suivantes et au goutte à goutte à partir de l'année 2002. Les quantités annuelles d'eau délivrées ont varié de 720 à 5449 litres/olivier en considérant des intervalles entre deux irrigations allant de 20 à 50 jours selon l'occurrence des évènements pluvieux. Les apports d'eau ont ciblé les stades phénologiques critiques. Au cours de la première année de culture des quantités réduites mais fréquentes d'eau (7 irrigations) ont été apportées afin de favoriser une bonne reprise des boutures après leur mise en place en verger.

Afin d'étudier de plus près la réponse des jeunes oliviers à l'apport hydrique en relation avec ses besoins et la disponibilité de l'eau dans le sol, nous avons examiné de plus près l'année 2003.

L'année 2003 a été caractérisée par un début d'année pluvieux, un été sec et chaud, comptant 27 jours de sirocco et un automne pluvieux. La quantité annuelle de pluie était de 790 mm avec une évapotranspiration ET_o-PM de 1212 mm. En période d'irrigation, de mars à septembre, l'ET_o-PM a été de 982 mm alors que les précipitations

ont atteint 346 mm représentant 45% des quantités annuelles. Les pluies efficaces ont été de 546 mm et 239 mm respectivement à l'échelle de l'année et de la saison d'irrigation.

Compte tenue de ces conditions climatiques l'irrigation a démarré le 15 mai et s'est poursuivie jusqu'au 5 septembre. Afin de maintenir l'humidité de la zone radiculaire à un niveau proche de la capacité au champ, les irrigations ont été apportées tous les 10 jours, excepté pour la 2ième quinzaine de mai et aux mois de juillet et d'août. Les quantités d'eau distribuées par irrigation ont varié de 333 à 1098 litres par arbre totalisant un apport annuel de 5449 litres par olivier. Ces quantités ont été converties en mm en considérant une surface humectée de 6m^2. Les valeurs sont données en litres et en mm dans le **Tableau 3**.

Tableau 3. Dates des irrigations et quantités moyennes d'eau appliquées par olivier (en litre et en mm) durant l'année 2003.

Irrigation	1	2	3	4	5	6	7	Total
Période	15/5-20/5	2/6-3/6	30/6-2/7	10/7-15/7	21/7-30/7	5/8-9/8	28/8-5/9	
Apport (litre)	823	333	549	843	902	902	1098	5449
Apports (mm)	137	56	92	140	150	150	183	908

NB : Interruption de l'irrigation au cours des journées du 18/5, 25-26 et 27/7, 31/8 et 4/9/2003.

Les quantités d'eau délivrées ont permis de couvrir 75% de la demande climatique annuelle (ET_o = 1212 mm) et 95% de la demande en période d'irrigation (ET_o = 982 mm).

1.4. Etat et bilan hydrique du sol

1.4.1. Mesures effectuées

Un suivi de l'humidité du sol a été réalisé en 2003 par des mesures à la sonde à neutrons Solo 25. Ces mesures ont démarré à partir du mois d'avril, au moment de la floraison et environ trois semaines avant le déclenchement de l'irrigation. En période d'irrigation les mesures neutroniques ont été réalisées de manières très rapprochée, au moyen de tubes en PVC que nous avons confectionnés nous même et qui ont été implantés à une profondeur de 150 cm autour de trois pieds d'olivier « Chétoui » à différentes distances du tronc **(figure 3).** Nous avons utilisé pour cela 28 tubes identiques, qui ont été placés autour de 3 oliviers Chétoui en tenant compte de l'hétérogénéité spatiale de l'humidité du sol en verger irrigué au goutte à goutte. Ainsi les tubes d'accès de la sonde à neutrons ont été placés sous la frondaison des 3 arbres, sur la ligne entre deux oliviers et au centre du carré formé par 4 oliviers. Les tubes placés sous les arbres et sur la ligne entre deux oliviers sont représentés par trois et deux répétitions respectivement. En dehors de ces zones, les tubes sont placés de manière à ce qu'ils soient en symétrie les uns par rapport aux autres et par rapport à la ligne qui passe par les emplacements 9, 10 et 11, situés à 3 m du tronc et orientée EO. Le tube placé au centre du carré de 4 oliviers représente la zone soumise à l'effet de la pluie et à l'évaporation du sol.

1.4.2. Etalonnage de la sonde à neutrons

Les mesures gravimétriques réalisées au cours de la campagne ont été utilisées pour l'étalonnage de la sonde à neutrons qui consiste à établir pour chaque profondeur une relation entre l'humidité volumique déterminée par gravimétrie et le quotient (N*) égal au rapport du comptage mesuré dans le sol (N_{sol}) rapporté à celui qui est mesuré dans l'eau (N_{eau}). La **figure 3** présente les différentes courbes d'étalonnage de la sonde en fonction de la profondeur avec un coefficient de corrélation variant de 0,69 à 0,83 (20-100 cm). En surface (0-20 cm), les valeurs de l'humidité volumiques utilisées sont celles que nous avons déterminées par gravimétrie. Les valeurs manquantes ont été simulées au moyen d'un modèle mathématique.

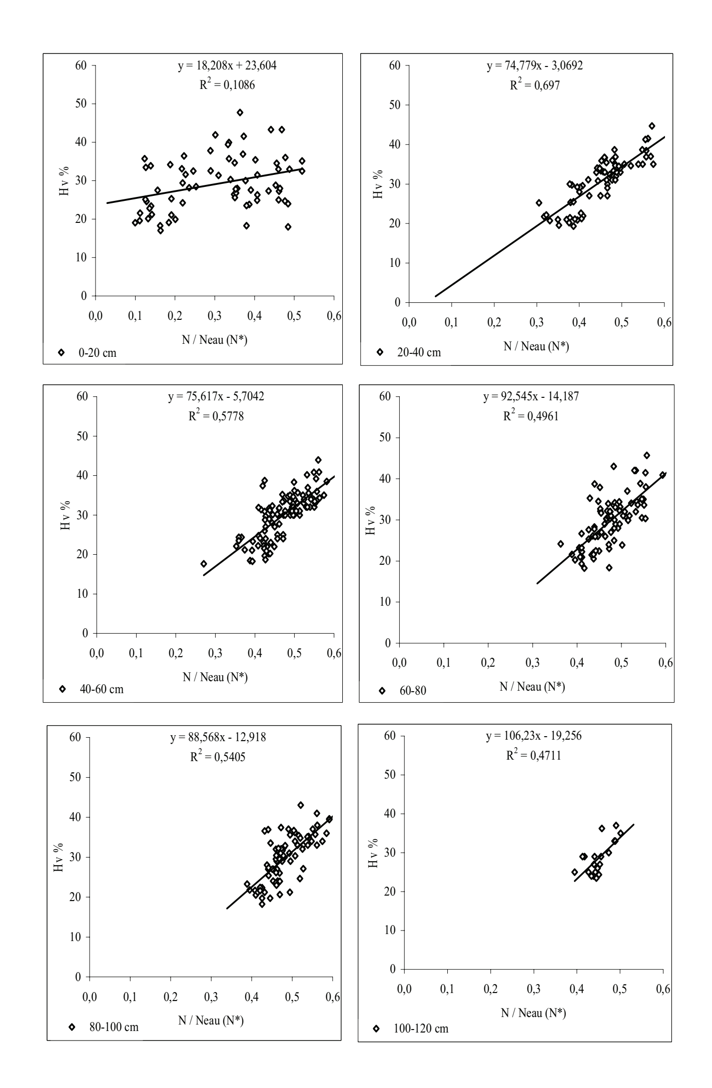


Figure 3. Courbes d'étalonnage de la sonde à neutrons (SOLO 25) pour différentes profondeurs exprimant l'humidité volumique du sol (H_v, %) en fonction du quotient N* égal au rapport entre les comptages mesurés dans le sol (N) et dans l'eau (N_{eau}) au moyen de la sonde à neutrons.

1.4.3. Evolution du stock d'eau du sol

Afin de pouvoir étudier l'évolution du stock d'eau dans le réservoir sol, nous avons considéré quatre zones dont l'humidité varie dans le même sens, définissant ainsi quatre réservoirs :

- Un premier réservoir est constitué par les tubes d'accès les plus proches de l'arbre, situés dans un rayon de 1,4 m (sous frondaison). Ce réservoir se détache nettement du reste des positions en période d'irrigation. Il est justement caractérisé par l'influence de l'irrigation. Il sera désigné dans le reste du texte par G1.

- Un deuxième réservoir regroupe les tubes d'accès situés dans un rayon de 2 m (limite de la zone des racines mais non couverte par la frondaison). Ce groupe se caractérise par une humidité intermédiaire entre le groupe G1 et le reste des positions. Il sera indiqué par G2.

- Les tubes d'accès situés en position intermédiaire, entre 2,2 et 2,8m du tronc constituent le réservoir G3 (zone se trouvant en dehors des racines). L'humidité de ce réservoir est proche de celle du réservoir G2 pendant la saison humide et légèrement plus faible pendant la saison sèche.

- Un quatrième réservoir est représenté par le tube d'accès situé à 4,2 m du tronc au centre du carré formé par quatre arbres voisins. Il se caractérise par les humidités les plus faibles pendant la saison sèche en raison de son exposition.

L'humidité du sol dans les quatre réservoirs considérés varie différemment selon la nature de l'apport d'eau (irrigation ou pluie) et selon la longueur de la période écoulée depuis le dernier événement. On distingue ainsi trois situations :

i) Après une période avec des pluies abondantes, le nuage de points est plutôt ramassé. L'humidité est élevée dans les trois zones et varie entre 35 et 40%. Les quatre réservoirs semblent être homogènes.

ii) En l'absence d'apport d'eau par pluie ou par irrigation le sol entre dans une phase de dessèchement et l'humidité au niveau des

réservoirs G4 et G1 est alors plus faible que pour réservoirs intermédiaires G2 et G3. Lorsque la période dessèchement s'allonge l'écart entre les réservoirs se creuse et l'humidité du sol est la plus faible dans le réservoir G4 suivi de G1 et de G2.

iii) A la suite d'une irrigation, l'humidité augmente au niveau du réservoir G1. Elle se maintient à des niveaux élevés allant de 30 à 40 % tout au long de la période d'irrigation.

L'évolution du stock au cours de la campagne de mesures est représentée dans la **figure 4** en fonction du temps séparément pour chaque groupe.

L'analyse de la **figure 4** montre que le stock d'eau a fluctué durant la campagne de mesures en rapport avec les évènements pluvieux et l'irrigation.

Au démarrage de la campagne de mesures neutroniques (avril), le stock est proche de 450 mm et montre peu de différences entre les 4 groupes. Il diminue au cours de la première décade du mois de mai, mais le déclenchement de l'irrigation le 15 mai a engendré son augmentation au niveau de G1 atteignant un maximum de l'ordre de 525 mm. A partir de cette date (mi mai) et jusqu'à la fin du mois de juin, le stock a évolué en dents de scie avec une tendance à la baisse en rapport avec l'alternance des périodes avec et sans irrigation. Le stock d'eau a évolué entre 350 et 480 mm avec des valeurs plus élevées pour G1 -qui se sont écartées progressivement des autres- et comparables pour G2 et G3.

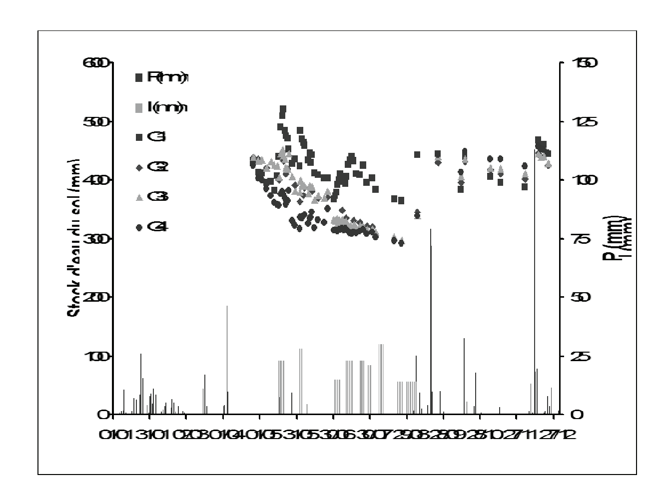


Figure 4. Evolution du stock d'eau dans le sol dans la couche 0-120 cm durant l'année 2003 dans les quatre zones considérées : à une distance de 1,4m du tronc (G1), à une distance de 2m (G2), à une distance de 2,8m (G3) et à 4,2m du tronc (G4). Les bâtonnets représentent les lames d'eau de pluie (P) et d'irrigation (I).

Les valeurs les plus faibles sont celles de G4 qui ont diminué continuellement pour atteindre 300 mm à la fin du mois de juin. Ce niveau a été maintenu jusqu'à fin août. Il reste toutefois supérieur au stock déterminé au point de flétrissement permanent. Pour les autres groupes les stocks ont continué à fluctuer avec une tendance à la baisse pour rejoindre plus ou moins le niveau atteint par G4 à la fin du mois de juin. A la suite de la reprise de l'irrigation au début du mois de juillet, le stock on augmenté de nouveau en particulier au niveau de G1. Au cours de la deuxième quinzaine de juillet et tout au long du mois d'août l'irrigation a été interrompue à de nombreuses reprises ce qui a conduit à une baisse des stocks, pour atteindre 350 mm à la fin du mois d'août. La reprise de l'irrigation à la fin du mois d'août a permis de maintenir le stock d'eau dans le réservoir G1 au-delà de 360 mm.

Les pluies reçues au début du mois de septembre ont augmenté le stock au niveau de G1 et ont ramené les stocks d'eau au niveau des

réservoirs G2, G3, et G4 au même niveau. Les pluies abondantes reçues vers mi septembre ont permis d'homogénéiser les stocks des quatre réservoirs, avec des valeurs légèrement plus élevées pour G4. Celui-ci étant soumis seulement à l'effet de la pluie et à l'évaporation directe du sol, qui diminue pendant cette période de l'année. Les stocks les plus faibles sont observés au niveau de G1 en raison de l'activité de la plante. Les écarts entre les quatre groupes ont été considérablement réduits au-delà du mois de novembre.

L'évolution du stock au cours de l'année a montré des variations importantes en particulier au cours de la période d'irrigation, c'est-à-dire entre mi mai et fin août. Ces variations sont liées à l'irrigation, à l'évaporation du sol et à l'activité radiculaire.

En période d'irrigation, les stocks de G4 sont les plus faibles en raison de l'absence d'apports hydrique et de l'effet de l'évaporation directe du sol mais ils dépassent tous les groupes en période de pluie à cause de l'absence de racines dans cette zone qui n'est soumise qu'à l'effet de la pluie et de l'évaporation du sol. Cette dernière diminue en cette période de l'année. Au contraire, le groupe 1 présente les valeurs les plus élevées entre mi mai et début septembre en raison des apports hydriques par l'irrigation. Au niveau de ce groupe, le sol est couvert par la canopée et n'est pas directement affecté par le rayonnement solaire. Ce groupe n'étant pas soumis à la même demande évaporatoire. Les groupes G3 et G2 présentent des valeurs intermédiaires du fait qu'ils ne sont pas soumis à l'irrigation et bénéficient d'un ombrage partiel en cours de journée, réduisant la composante évaporation du sol.

L'évolution du stock d'eau examinée de manière globale à l'échelle de la campagne est sous l'influence des évènements pluvieux, l'irrigation et l'évapotranspiration, mais telle que présentée elle ne fait pas apparaître l'effet de l'activité de la plante et la modalité de fonctionnement du réservoir sol lorsqu'il est placé sous différentes conditions hydriques. L'examen des profils hydriques à différentes dates peut nous permettre de mettre en évidence l'activité de la plante et sa relation avec les différents compartiments du sol.

1.4.4. Fonctionnement du réservoir sol

L'humidité du sol dans les différents compartiments étudiés et sa distribution le long du profil est analysée pour trois situations types. Pour cela nous avons considéré trois dates caractérisées par des conditions climatiques et culturales différentes. La première date est celle du 29/5/2003 correspondante à l'état sec (période non irriguée, stock mesuré après 10 jours de l'arrêt de la première irrigation et à la veille de l'irrigation suivante). Du point de vue phénologique elle correspond au stade de croissance rapide du fruit. La deuxième date est celle du 16/7/2003 correspondante au lendemain de l'arrêt de l'irrigation (période d'irrigation). Elle se situe en pleine période d'induction florale. La troisième date est choisie au mois de septembre (23/09/2003) après des pluies abondantes de 90 mm. Elle correspond à la période de grossissement des olives.

1.4.4.1. Humidité dans la zone irriguée sous la frondaison

La zone sous frondaison est humectée par l'irrigation et la pluie. Elle est ombragée par la frondaison et sujette à l'évaporation à partir du sol et à l'absorption radiculaire.

L'analyse de la **figure 5** montre que les différences les plus importantes de l'humidité dans les trois situations choisies sont observées au niveau de la tranche de sol 0-40 cm. Les profils I (juillet) et P (septembre) présentent une évolution comparable avec une humidité volumique allant de plus de 40 à 35% en fonction de la profondeur en dépit de conditions climatiques différentes. Le profil S présente une humidité plus faible en surface par rapport aux deux autres en raison du dessèchement du sol (mai) au niveau de la tranche 0-40 cm. L'humidité maximale de ce profil sec est située au niveau de l'horizon 80-100 cm.

Au niveau du groupe 1, l'humidité volumique est importante en surface au cours des périodes de pluie et d'irrigation, de l'ordre de 40%. Elle est plus faible en période sèche. Au niveau de la tranche de sol 20-40 cm, l'humidité volumique du profil I est intermédiaire entre les deux

profils. Elle plus élevée que celle du profil sec en raison de l'irrigation malgré une demande climatique plus élevée en juillet. A partir de l'horizon 40-60 cm, les humidités des profils P et S montrent des valeurs proches et évoluent de manière quasi-similaire au profil I avec des valeurs comprises entre 30 et 40%.

Les différences de l'humidité du sol sous frondaison observées entre les 3 profils au niveau de la tranche 0-40 cm résultent de l'effet combiné de l'évaporation et de l'activité radiculaire. Au cours du mois de mai (profil sec) les racines sont actives et absorbent l'eau disponible pour subvenir aux besoins de la transpiration et de la croissance des fruits en division. En septembre, le sol est gorgé d'eau à la suite des pluies abondantes survenues au cours de la semaine c'est ce qui explique les valeurs élevées de l'humidité.

En période estivale (profil irrigué), l'activité des racines et la croissance végétative dépendent de la disponibilité de l'eau et de la température. Dans notre cas nous avons observé en 2003 une faible croissance estivale au niveau de la canopée. Les valeurs élevées de l'humidité résultent plutôt de l'effet de l'irrigation qui a permis de contrebalancer l'effet de l'évapotranspiration et de maintenir le sol à des humidités proches de celles que nous avons observées en période de pluie. La diminution de l'humidité au niveau de la tranche de sol 20-40 cm résulte de la présence de racines avec une densité radiculaire élevée à des distances de 40 et 80 cm du tronc.

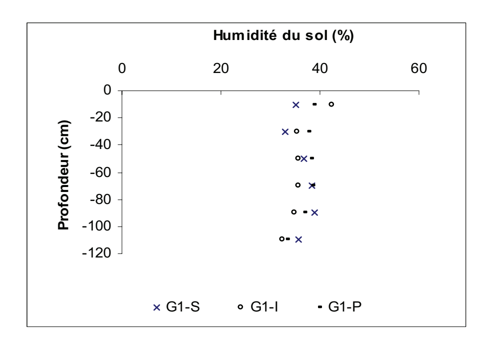


Figure 5. Humidité (%) du profil du sol (0-120 cm) au niveau du réservoir G1, dans trois situations : après dessèchement du sol (G1-S) (29-05-2003), après irrigation (G1-I) (16-07-2003) et après une pluie abondante (G1-P) (23-09-03).

1.4.4.2. Humidité dans la zone intermédiaire hors frondaison

La zone intermédiaire hors frondaison est humectée par la pluie. Elle est partiellement ombragée par la frondaison et sujette à l'absorption radiculaire. L'analyse de la **figure 6** montre des différences entre les trois profils sec, irrigué et pluvieux. Les variations d'humidité les plus importantes sont observées au niveau de la tranche de sol 0-40 cm. Le profil P présente une évolution comparable à celle que nous avons observée au niveau de G1. Le profil sec n'est pas dans ce cas le moins humide. Il montre des valeurs intermédiaires en surface (0-40 cm) puis il rejoint les valeurs observées au niveau du profil pluvieux à partir de la tranche de sol 40-60 et même dépasse ses valeurs en profondeur. Il présente des valeurs plus faibles que le profil P en surface puisque la demande évaporatoire au mois de mai est plus élevée qu'en septembre. Mais cette demande climatique n'est pas très élevée pour atteindre les horizons profonds de plus de 60 cm. Le profil irrigué présente dans ce cas (éloignement de 2 m du tronc) les humidités les plus faibles au niveau de tous les horizons avec une valeur de l'ordre de 15% en surface et de 30% à 1m de profondeur en raison de l'importance de la demande évaporatoire au mois de juillet.

Au niveau de G2, l'humidité volumique en surface est importante en période de pluie (40%) mais beaucoup plus faible au cours de journées irriguées et sans apport hydrique. Le profil I présente à 2 m du tronc des humidités plus faibles que celles que nous avons observées une vingtaine de jours après la dernière pluie sans le moindre apport hydrique (G2-S). Cette situation résulte de l'augmentation de la demande climatique en juillet et à la plus grande exposition de ce groupe au rayonnement solaire. Il est en effet soumis à l'activité des racines et donc à la transpiration du jeune olivier puisque les racines ont atteint en 2003 la distance de 2m et à l'évaporation du sol du fait que celui-ci n'est que partiellement ombragé par la canopée.

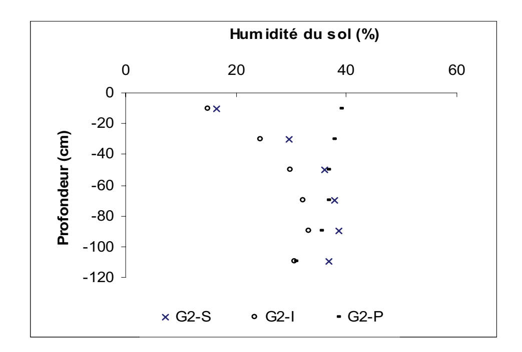


Figure 6. Humidité (%) du profil du sol (0-120 cm) au niveau du réservoir G2, dans trois situations : après dessèchement du sol (G2-S) (29-05-2003), après irrigation (G2-I) (16-07-2003) et après une pluie abondante (G2-P) (23-09-03).

1.4.4.3 Humidité dans la zone hors racines

Cette zone est représentée par G3, au niveau duquel les stocks sont mesurés entre 2,2 et 2,8 m du tronc. Cette zone se trouve hors de la portée des racines et est humectée par la pluie. Elle est partiellement ombragée par la frondaison au cours des matinées et des après midi et est sujette à l'évaporation du sol.

L'analyse de la **figure 7** montre des différences entre les trois profils 'sec', 'irrigué' et 'pluvieux'. Les écarts les plus importants ont été observés au niveau de la tranche de sol 0-80 cm.

Le profil P présente une évolution comparable à celle que nous avons observée dans les groupes 1 et 2 bien qu'il ne soit pas soumis à l'effet des racines et par conséquent à l'effet de la transpiration des jeunes oliviers. Ses humidités évoluent de 40% à 30% environ en allant vers la profondeur du sol. Le profil S présente des valeurs beaucoup plus faibles que le profil P puisque la demande évaporatoire au mois de mai est plus élevée qu'en septembre et qu'il n'y a pas eu d'apports hydriques dans cette zone pour restituer les pertes en eau. Le profil I présente les humidités les plus faibles au niveau de tous les horizons avec une valeur de l'ordre de 15% en surface et de 30% à 1m de profondeur. Il se trouve dans une situation comparable à celle du profil S.

Au niveau de G3, l'humidité volumique en surface est importante en période de pluie et est plus faible en période sèche et d'irrigation. Cette situation résulte de l'exposition de ce groupe au rayonnement direct qui fait que l'évaporation de l'eau du sol soit importante en mai (G3-S) et d'avantage en juillet (G3-I).

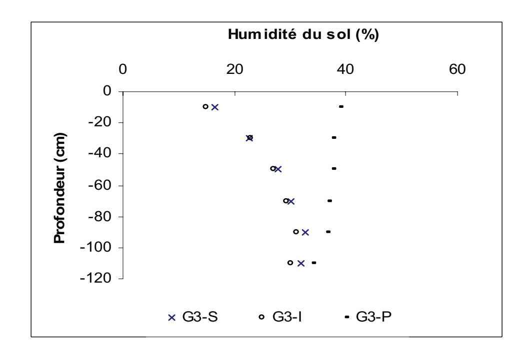


Figure 7. Humidité (%) du profil du sol (0-120 cm) au niveau du réservoir G3, dans trois situations : après dessèchement du sol (G3-S) (29-05-2003), après irrigation (G3-I) (16-07-2003) et après une pluie abondante (G3-P) (23-09-03).

1.4.4.4. Humidité dans la zone la plus éloignée du tronc

Ce groupe est représenté par le stock d'eau mesuré à 4,2 m du tronc. Cette zone est humectée seulement par la pluie. Elle est sujette à l'évaporation directe du sol.

L'analyse de la **figure 8** montre une différence importante des humidités de surface (0-20 cm) qui sont de l'ordre de 40% au niveau du profil humide (G4-P) et de 15% environ pour les profils irrigués (G4-I) et sec (G4-S). L'écart entre les profils diminue en fonction de la profondeur.

En période de pluie, les humidités volumiques au niveau de G4 sont comparables à celles des autres groupes en raison de l'homogénéisation de l'état hydrique du sol par les pluies. Cette figure présente pour les profils P et I la même évolution que celle que nous avons observée pour le groupe 3.

En période de pluie, l'humidité du sol évolue de manière comparable pour les 4 groupes en raison de l'homogénéisation de l'état du sol. La situation est différente en période d'irrigation. Le profil I présente au niveau des groupes 2, 3 et 4 des humidités en surface proches de celles du profil S malgré la longue période sans apport hydrique et ce en raison de l'importance de la demande climatique au mois de juillet. Au niveau de G1 les valeurs de l'humidité en surface sont proches de celles qui sont observées en période de pluie en raison de l'irrigation qui a permis de contrebalancer la demande climatique et répondre au besoin en eau des jeunes oliviers. Au-delà des horizons de surface, les profils sec, irrigué et pluvieux se rapprochent mais à des profondeurs variables.

Les variations importantes de la dynamique de croissance observées au cours de la période d'expérimentation sont inhérentes à une multitude de facteurs parmi lesquels l'eau est une composante principale. Les relations établies entre la croissance en hauteur et le niveau de satisfaction des besoins en eau ont montré qu'elle affecte dans une large mesure la réponse de du jeune olivier. L'étude de la dynamique de l'eau a montré que le fonctionnement du réservoir sol et donc la consommation diffère selon la position par rapport au tronc en raison de l'hétérogénéité

de la répartition des racines et de la variation des densités radiculaires d'une zone à l'autre même en dessous de la canopée.

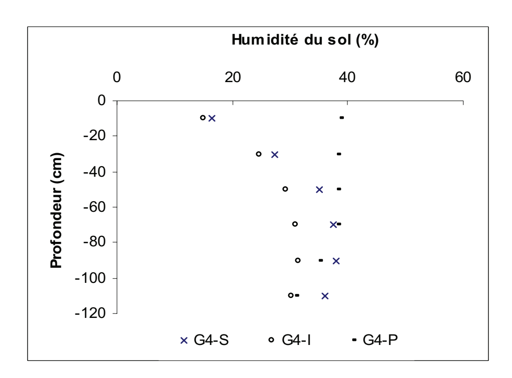


Figure 8. Humidité (%) du profil du sol (0-120 cm) au niveau du réservoir G4, dans trois situations : après dessèchement du sol (G4-S) (29-05-2003), après irrigation (G4-I) (16-07-2003) et après une pluie abondante (G4-P) (23-09-03).

La complexité du système pose le problème du choix des sites de mesure et de la représentation spatiale de ces sites et rend difficile l'établissement du bilan hydrique. Compte tenu de cette difficulté nous avons essayé de cerner davantage le problème en déterminant la consommation de l'olivier ou sa transpiration pris dans ce cas comme individu par la mesure du flux de la sève brute.

2. Transpiration de l'olivier : La méthode de flux de sève

2.1. Introduction

L'utilisation de la méthode du bilan hydrique pour la détermination de la consommation en eau des jeunes oliviers irrigués au goutte à goutte pose le problème du choix des sites de mesure et de la représentation spatiale de ces sites. En raison du faible taux de couverture du sol et de

l'hétérogénéité du système radiculaire, nous avons différentes entités différentiables, relative chacune à une zone bien définie du réservoir sol, soumise à une demande climatique donnée. Au niveau de ces compartiments, nous avons constaté que l'humidité en période d'irrigation particulièrement et par conséquent le stock d'eau varie considérablement. Le fonctionnement du réservoir sol à ce niveau fait que cette consommation diffère selon la position par rapport au tronc en raison de l'hétérogénéité de la répartition des racines et de la variation des densités radiculaires d'une zone à l'autre même en dessous de la canopée. Le rayonnement intercepté et la réponse de la plante diffèrent selon qu'on se place sous la frondaison des arbres (zone ombragée avec présence des racines), en dehors de la frondaison (zone intermédiaire en présence d'un faible nombre de racines) ou loin de celle-ci (zone de sol nu), qu'on soit en période de pluie ou en période sèche, que l'on irrigue ou pas.

Compte tenu de cette variabilité et de la difficulté pour déterminer exactement la consommation par la méthode du bilan hydrique, nous nous sommes proposés de déterminer la composante transpiration du jeune olivier par la mesure du flux de la sève brute et analyser ses facteurs de variations.

2.2. Dispositif de mesure de flux delà sève et signaux collectés

Afin de déterminer la transpiration des jeunes oliviers, nous avons mis en place au cours de l'année 2003 un dispositif de mesures du flux de la sève brute constitué d'un ensemble de capteurs thermiques et d'une centrale d'acquisition des données. La centrale est alimentée par une batterie de 12 V, rechargeable au moyen d'un panneau solaire. Afin d'éviter son épuisement elle est remplacée régulièrement. Nous avons utilisé deux types de capteurs : des capteurs de la marque Dynamax et des capteurs fabriqués selon la méthode INRA-France (qu, 1985). Les capteurs diffèrent par leur longueur et leur résistance chauffage.

Au début de l'année 2003, nous avons installé dix capteurs sur trois oliviers Chétoui âgés de 6 ans et de vigueur comparable (sept capteurs

Dynamax et 3 INRA). L'un des arbres porte les deux types de sondes. Celles-ci ont été insérées radialement sous l'écorce du tronc à 40 cm au-dessus du niveau du sol selon différentes orientations. L'arbre 1 porte les capteurs Dynamax 1, 2 et 3, l'arbre 2 porte les capteurs Dynamax 4, 5 et 6 alors que l'olivier 3 porte les deux types de capteurs numérotés 7,8 et 9 pour les capteurs INRA et 10 pour le capteur Dynamax. Etant donné que les signaux de flux sont enregistrés sur la même centrale que les données météorologiques, nous avons fais précédé les chiffres attribués aux capteurs de flux par les lettres FS (flux de sève). Les capteurs sont orientés comme suit :

Arbre 1 : FS1 : N - FS2 : SE et FS3 : SO
Arbre 2 : FS4 : N - FS5 : SE et FS6 : SO
Arbre 3 : FS7 : N - FS8 : SE - FS9 : SO et FS10 : E

L'installation a été ensuite enveloppée par un film en aluminium isotherme afin d'éviter le réchauffement des capteurs par le rayonnement direct et qui est réfléchi par le sol.

Dans le cas de la présente expérimentation, un régime de chauffage alternatif de 30 mn de chauffage/30 mn de non chauffage a été adopté pour tous les capteurs. Les mesures sont réalisées toutes les minutes et la moyenne sur 5 minutes est enregistrée par l'unité d'acquisition. Les données sont transférées à un ordinateur portable tous les dix jours. Elles sont utilisées pour estimer le flux de la sève.

Les premières mesures de flux ont été obtenues au cours du mois de mars 2003. Les valeurs relatives au flux de la sève et les paramètres climatiques suivis au niveau du site sont enregistrées au niveau de la centrale d'acquisition des données sous une forme physique, c'est - à – dire une tension, exprimée en mV. Dans la **figure 9** un exemple de l'évolution des signaux enregistrés par les capteurs Dynamax FS4, FS5 et FS6 et du rayonnement global est présenté pour une journée d'été ensoleillée ; le 26/7/2003.

L'analyse de la **figure 9** montre une évolution synchrone des signaux horaires produits par les 3 capteurs Dynamax FS4, FS5 et FS6. Ils

évoluent entre les valeurs minimales (V_{off}) enregistrées à la fin de la période de refroidissement (non chauffage) et les valeurs maximales (V_{on}) atteintes à la fin de la période de chauffage. La valeur pic de cette journée est observée aux alentours de 5 heures du matin. Elle correspond au flux de sève minimum de cette journée du 26/7/2003.

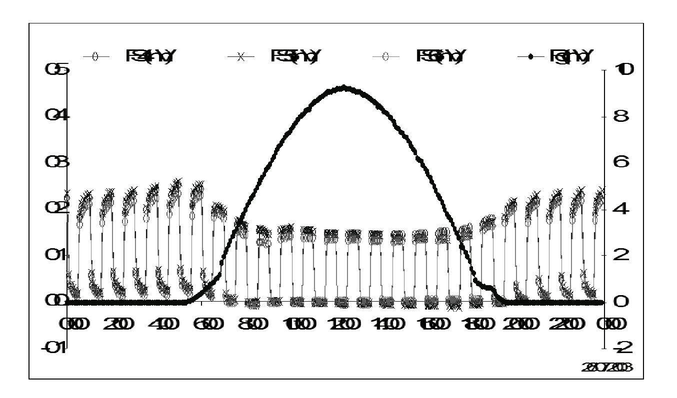


Figure 9. Evolution des signaux des capteurs de flux de sève et du rayonnement global au cours d'une journée ensoleillée du 26/07/2003. Les trois capteurs sont installés sur le même arbre selon les orientations SE (FS4), SO (FS5) et NE (FS6).

Au cours d'un cycle de chauffage, les valeurs de flux évoluent différemment pendant les heures diurnes (entre 7 heures du matin et 19 heures) et nocturnes. Au cours de la nuit, les signaux n'atteignent pas de palier que ce soit pendant la phase de chauffage ou de refroidissement, mais une valeur maximale de l'ordre de 0,20 - 0,25 mV ou minimale proche de 0. Pendant le jour les signaux atteignent rapidement les valeurs d'équilibre V_{on} et V_{off}. Les signaux se stabilisent à une valeur maximum de 0,15 mV environ et une valeur minimale pratiquement nulle ou négative. La transition entre le régime nocturne et diurne est rapide. Le palier nocturne ou diurne est établi au bout du 3ème cycle que ce soit à l'aube ou à l'aurore **(Figure 10).**

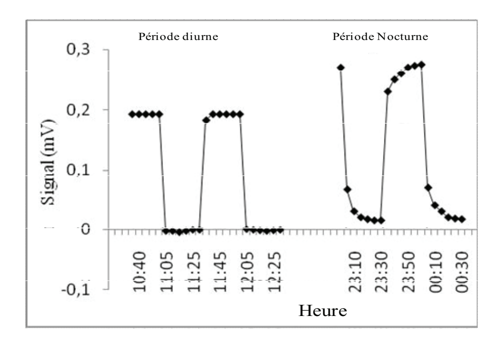


Figure 10. Evolution des signaux (mV) durant les périodes diurnes et nocturnes.

Les signaux évoluent de manière synchrone avec le rayonnement global. Ils sont plus élevés la nuit en absence de rayonnement et plus faibles le jour que ce soit pour les valeurs maximales ou minimales. Pour des valeurs de Rg nulles, le signal maximal varie de 0,20 à 0,25mV alors que les signaux minimum sont proches de zéro mais positifs. Au début de la journée et dès 6 heures du matin, les signaux de flux commencent à diminuer alors que le rayonnement global augmente. Lorsque celui-ci atteint son maximum, de 9 mV environ vers 13 heures, le signal maximal au niveau des capteurs de flux est de l'ordre de 0,15 mV alors que les valeurs minimales sont pratiquement nulles et mêmes négatives. A la fin de la journée et au fur et à mesure que Rg diminue, les valeurs maximales et minimales des signaux de flux augmentent de nouveau.

La variation des signaux au cours du jour résulte de la variation de l'écart de température (ou de potentiel) entre les deux sondes du capteur (ou entre les deux thermocouples). En absence de flux transpiratoire pendant la nuit, c'est-à-dire pour un rayonnement global nul, la différence de températures est maximale entre la sonde chauffée et la sonde de référence non chauffée du capteur. Pendant les heures diurnes, le passage du flux qui résulte de l'augmentation du rayonnement global (ou de la demande climatique) tend à homogénéiser le milieu sève - bois réduisant ainsi l'écart de température entre les deux sondes du capteur,

c'est ce qui explique la baisse des signaux au cours de la journée et l'établissement des paliers.

Ces résultats sont cohérents avec ceux présentés dans la littérature et en particulier les travaux de Mahjoub (2004) et Abid-Karray (2006) entrepris en Tunisie. Le cycle de 30 mn de chauffage et de 30 mn de non chauffage est convenable malgré le nombre d'observations limité.

2.3. Détermination de la densité de flux

Les signaux collectés au cours de la campagne 2003 ont été traités en vue de les traduire en densité de flux en adoptant la procédure de calcul développée par Do et Rocheteau (2002). La procédure consiste à déterminer pour chaque cycle de chauffage, la différence (ΔT_a) entre les écarts de température ΔT_{on} et ΔT_{off} enregistrés respectivement à la fin de la période de chauffage et de la période de non chauffage ΔT_{off} **(Equation 1).**

$$\Delta T_a = \Delta T_{on} - \Delta T_{off} \quad [1]$$

L'indice du flux K (Equation 2) est calculé à partir de ΔT_a et de ΔT_{max} par :

$$K = (\Delta T_{max} - \Delta T_a) / \Delta T_a \quad [2]$$

Où ΔT_{max} représente l'écart de température mesurée à flux nul.

La calibration de cette méthode par Do et Rocheteau (2002) avec différentes combinaisons de cycles de chauffage / non chauffage sur une colonne hydraulique artificielle remplie de sciure de bois a permis de définir une relation exponentielle *(Partie A, Equations 30 et 31)* entre l'indice du flux (K) (Equation 3) et la densité de flux u (Equation 4) tel que :

$$K = 1 / (1+11,3\ u^{-1,414}) \quad [3]$$

$$Ou \quad u = (11,3\ K\ /\ 1\text{-}K)^{0,707} \quad [4]$$

La densité de flux u est exprimée en litre dm^{-2} $heure^{-1}$ et K est un paramètre sans dimension.

Le passage de la densité de flux au flux horaire nécessite la connaissance de la section conductrice et l'étalonnage des capteurs compte tenu de nos conditions expérimentales. Nous avons adopté les valeurs de Do et Rocheteau (2002 b), pour le calcul de la densité de flux.

2.4. Evolution des valeurs de la densité de flux à l'échelle du jour

La densité de flux de la sève mesurée par les deux types de capteurs est analysée à l'échelle du jour en considérant une journée d'été ensoleillée avec une bonne alimentation en eau. La **figure 11** représente l'évolution horaire de la densité de flux au cours de la journée du 26/7/2003 pour les capteurs 4, 5 et 6 de type Dynamax et l'évolution simultanée du rayonnement global.

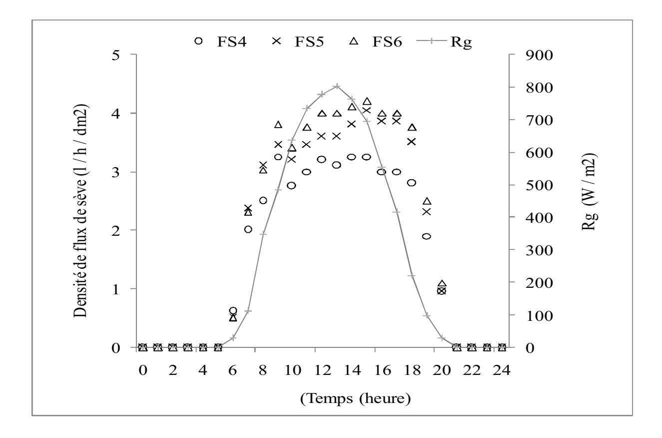


Figure 11. Evolution des valeurs horaires de la densité de flux de sève et du rayonnement global au cours d'une journée ensoleillée du 26/07/2003.

Les trois capteurs sont installés sur le même arbre selon les orientations N (FS4), SE (FS5) et SO (FS6).

L'examen de la **figure 12** montre que les valeurs de la densité du flux mesuré par les 3 capteurs varient considérablement à l'échelle du jour, mais elles suivent globalement l'évolution de Rg. Elles évoluent dans le même sens mais avec des proportions variables selon l'heure de la journée. De même, les trois capteurs présentent une évolution synchrone entre eux mais avec quelques différences observées au début de la matinée et de l'après midi.

Nous avons considéré qu'en l'absence de rayonnement, la densité de flux est nulle, négligeant ainsi les flux nocturnes éventuels. A la levée du jour, les densités augmentent rapidement à partir de 6 heures du matin jusqu'à 9 heures, heure à laquelle nous observons une chute des valeurs au niveau des trois capteurs. La densité de flux augmente de nouveau à partir de l'heure qui suit, c'est-à-dire 10 heures alors que le rayonnement a continué à augmenter de manière régulière au cours de ces premières heures matinales.

A partir de 10 heures du matin, les densités de flux et le rayonnement évoluent de manière synchrone jusqu'à 13 heures, heure à laquelle nous avons enregistré le maximum du rayonnement global (3 Mj/m^2/h) alors que les valeurs maximales de la densité de flux sont observées 2 heures plus tard pour les capteurs FS5 et FS6 (4 litres/heure/dm^2). Le capteur FS4, par contre, montre un maximum de l'ordre de 3,5 litres/heure/dm^2 vers 9 heures du matin. Son évolution se détache de celle des deux autres capteurs durant l'après midi.

Le rayonnement global commence à décliner à partir de 13 heures alors que les valeurs de flux sont maintenues pendant quelques heures à des valeurs comprises entre 3 et 4 litres/heure/dm^2. Elles commencent à diminuer à partir de 15 heures. Au-delà de 17 heures, la densité de flux diminue rapidement et s'annule vers 21 heures. La **figure 12** montre une étroite corrélation entre la densité de flux et le rayonnement global pour différentes conditions hydriques.

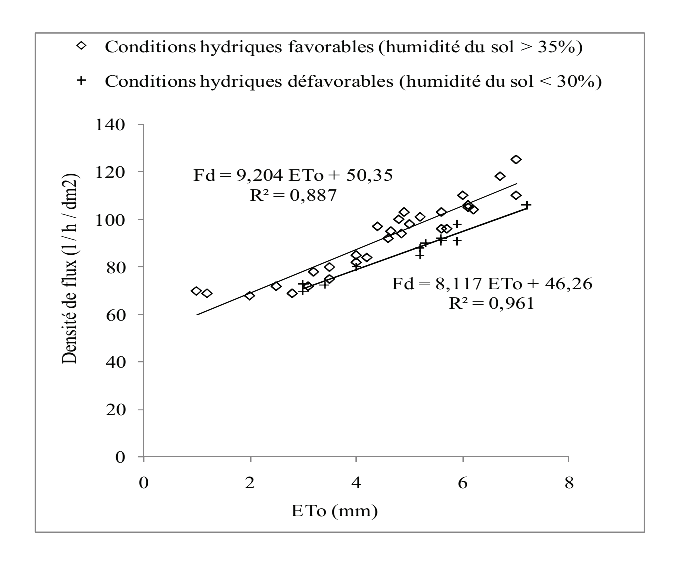


Figure 12. Corrélations entre la densité de flux de sève (Fd, l/heure/dm^2) et l'évapotranspiration de référence (ETo, mm/jour) pour différents hydriques du sol.

2.5. Analyse de la différence entre les signaux des capteurs

La série de données enregistrées au cours de la période d'expérimentation montre des différences entre les densités de flux mesurées par les différents capteurs. Nous consacrons ce paragraphe à l'analyse des sources de variations qui sont liées au type de capteur et à sa positions et aux conditions hydriques et climatiques.

2.5.1. Influence de la position du capteur

Afin de pouvoir comparer les différentes orientations au niveau du même arbre nous avons tracé pour chaque olivier l'évolution de la densité de flux horaire de différents capteurs (selon les différentes orientations) en fonction du flux moyen de l'arbre en question.

Au niveau de l'arbre 1 **(figure 13),** les 3 capteurs FS1, FS2 et FS3 présentent la même tendance mais des valeurs de la densité différentes qui situent le nuage des points au niveau de la 1ière bissectrice (FS 1), en dessous de celle-ci (FS 2) et au dessus (FS3). Cette différence montre que le capteur FS3 surestime les valeurs de la densité de flux. Pour une valeur moyenne des mesures de l'ordre de 4 l/dm^2/h, il donne des valeurs de l'ordre de 5 l/dm^2/h alors que le capteur FS2 produit des densités de l'ordre de 2 l/dm^2/h.

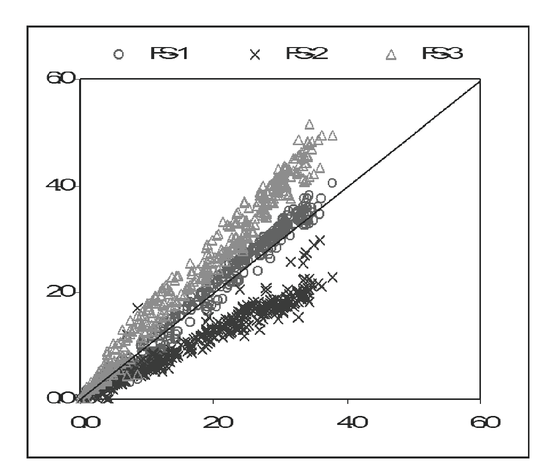


Figure 13. Densité de flux horaire (litre/dm^2/heure) enregistrée par les trois capteurs de l'arbre 1 en fonction de la moyenne des mesures. Les orientations des capteurs FS1, FS2 et FS3 sont respectivement N, SE et SO. Les capteurs sont de type Dynamax. Les mesures correspondent à une trentaine de jours répartis sur toute l'année ou l'état hydrique du sol est bon.

Au niveau de l'arbre 2 **(figure 14),** les 3 capteurs FS4, FS5 et FS6 présentent des nuages de points quasiment confondus. Pour des valeurs moyennes des mesures dépassant 2 litres/dm^2/heure, le capteur FS4 s'écarte légèrement du reste des observations.

Au niveau de l'arbre 3 **(figure 15),** les 3 capteurs FS7, FS8 et FS9 présentent la même tendance mais produisent des valeurs de la densité différentes qui situent le nuage des points au niveau de la 1ière bissectrice (FS 9), en dessous de celle-ci (FS 7) et au dessus (FS8). Cette différence montre que le capteur FS8 surestime les valeurs de la densité de flux par rapport aux deux autres. Pour une valeur moyenne des mesures de l'ordre de 3,5 litres/dm^2/heure environ, il donne des valeurs de l'ordre de 4,5 litres/dm^2/heure alors que le capteur FS7 produit des densités de 2,5 l/dm^2/heure.

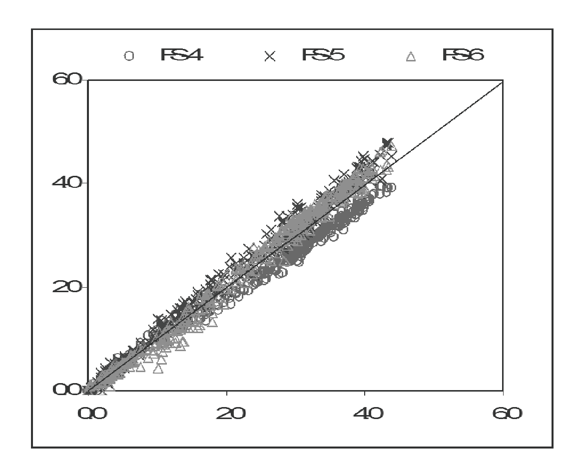


Figure 14. Densité de flux horaire (litre/dm^2/heure) enregistrée par les trois capteurs de l'arbre 2 en fonction de la moyenne des mesures. Les orientations des capteurs FS4, FS5 et FS6 sont respectivement N, SE et SO. Les capteurs sont de type Dynamax. Les mesures correspondent à une trentaine de jours répartis sur toute l'année ou l'état hydrique du sol est bon.

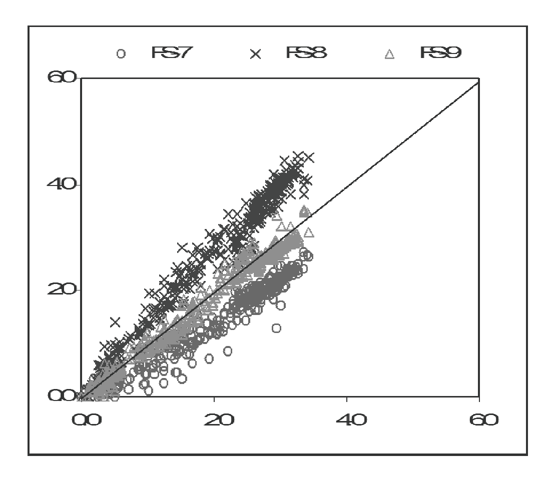


Figure 15. Densité de flux horaire (litre/dm^2/heure) enregistrée par les trois capteurs de l'arbre 3 en fonction de la moyenne des mesures. Les orientations des capteurs FS7, FS8 et FS9 sont respectivement N, SE et SO. Les capteurs sont de type INRA. Les mesures correspondent à une trentaine de jours répartis sur toute l'année ou l'état hydrique du sol est bon.

La comparaison des trois figures montre que pour une même orientation les valeurs de flux peuvent se confondre avec la 1^{ière} bissectrice ou s'écarter dans un sens ou dans l'autre. La position du capteur qui représente cette orientation varie ainsi d'un arbre à l'autre. Au niveau de l'arbre 1, les valeurs les plus élevées de la densité de flux ont été observées au niveau du capteur FS3 orienté SO alors qu'au niveau de l'arbre 3 les densités de flux les plus élevées sont celles du capteur FS8 orienté SE. Les valeurs de densité les plus faibles ont été observées au niveau des arbres 1, 2 et 3 respectivement par les capteurs FS2 orienté SE et FS4 et FS7 orientés tous les deux N.

Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Abid-Karray (2006) se rapportant à la variabilité du flux en fonction de l'orientation. Les différences entre les capteurs mettent en évidence l'hétérogénéité du flux

dans la section du bois. Elle est probablement liée à l'orientation ou à la nature de la connexion des vaisseaux du xylème avec la partie aérienne.

2.5.2. Influence du type de capteur

Les capteurs Dynamax et INRA sont construits selon le même principe (Granier, 1985) mais présentent des caractéristiques physiques différentes notamment au niveau de la longueur des sondes et de leur résistance. Leur réponse est illustrée par la **figure 16**.

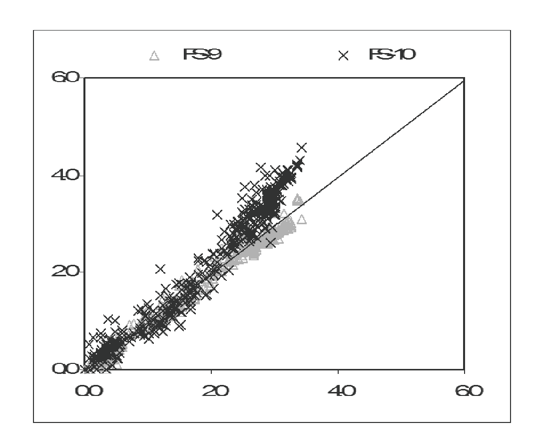


Figure 16. Densité de flux horaire (litre/dm^2/heure) enregistrée par deux capteurs de type INRA (FS9) et Dynamax (FS10) installés sur le même arbre en fonction de la moyenne des mesures. Les orientations des capteurs sont respectivement SO et SE pour FS9 et FS10.

La comparaison des deux types de capteurs placés sous des conditions similaires montre qu'ils produisent des valeurs de flux comparables pour une valeur moyenne de la densité de flux donnée. Au-delà de 2 l/dm²/h, les valeurs produites par les deux types de capteurs divergent. Pour une valeur moyenne de la densité de 3,5 litres/dm^2/heure, nous obtenons des valeurs maximales de densité de l'ordre de 3litres/dm^2/heure pour le capteur FS9 (INRA) et dépassant 4 litres/dm^2/heure pour le capteur FS10 (Dynamax).

2.6. Réponse de l'arbre à la demande climatique et à l'état hydrique du sol

2.6.1. Evolution en fonction de la demande climatique

Afin de déterminer la réponse de l'olivier à la demande climatique nous avons considéré parmi les 30 jours sélectionnés des journées types caractérisées par une demande climatique différente, pour lesquelles nous avons comparé l'évolution de la densité du flux moyenne des trois arbres en relation avec celle du rayonnement global. La **figure 17** présente l'évolution de la densité de flux et de R_g au cours de deux journées à faible demande climatique (17 et 18/10/2003) choisies en période de pluie. Au cours de la journée du 17/10 nous avons enregistré une pluie de l'ordre de 6 mm, une ET_o de 1,4 mm / jour, une T_{max} de 25° et T_{min} de 19°C. La journée du 18/10 est nuageuse sans pluie. Elle est caractérisée par des températures maximale de 24°C et minimale de 19°C avec une ET_o de 1,9 mm / jour.

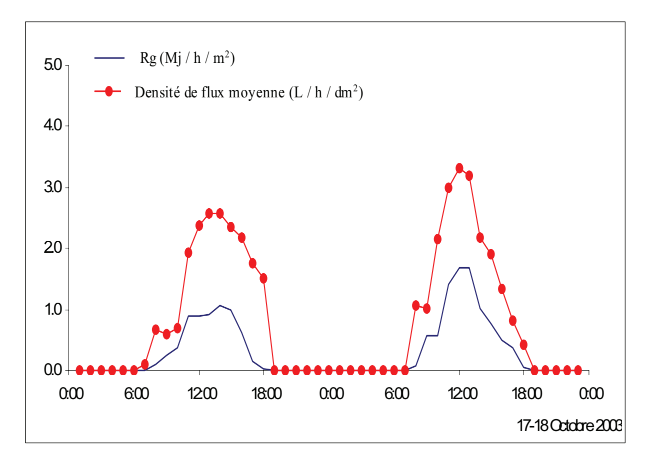


Figure 17. Valeurs horaires de la densité moyenne de flux de sève et du rayonnement global (Rg) au cours de deux journées à faible demande climatique (17 et 18/10/2003). L'état hydrique du sol est bon suite à une période pluvieuse.

La **figure 18** montre que la densité de flux évolue de manière synchrone avec le rayonnement global. Ses valeurs varient de zéro à 3,25 litres/dm^2/heure pour des valeurs de rayonnement allant de 1 à 2 Mj/m^2/heure. Pour la journée du 17, le flux de sève mesuré atteint un maximum de 2,5 l/dm²/heure. Les valeurs de R_g sont plus élevées au cours de la journée du 18/10 et se sont traduites par des densités de flux plus importantes par rapport à la journée précédente, au cours de laquelle nous avons observé des valeurs de R_g et de flux plus faibles en particulier entre 10 et 15 heures.

Pour une demande climatique plus élevée et un état hydrique du sol caractérisé par une humidité élevée (19 et 20/9/2003), la densité de flux augmente et atteint les valeurs maximales de 3,5 l/dm²/h pour la journée de 19/09/03 et 4,0 l/dm²/h pour la journée du 20/09/3 **(figure 18).**

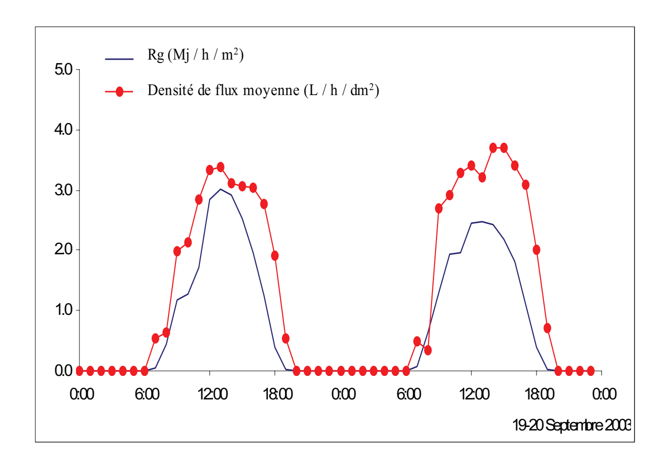


Figure 18. Valeurs horaires de la densité moyenne de flux de sève et du rayonnement global (Rg) au cours de deux journées demande climatique modérée. L'état hydrique du sol est bon suite à une période pluvieuse.

La journée du 19/9 est une journée nuageuse au cours de laquelle nous avons enregistré quelques traces de pluie (0,2 mm). Elle est caractérisée par des températures maximale et minimale de l'ordre de 28

et 19°C respectivement et une ET_o de 3,7 mm. La journée du 20 septembre est caractérisée par des températures maximale et minimale de 27 et 17°C respectivement, avec une demande climatique de même ordre de grandeur que pour le 19/09/03. Des nuages ont été observés le 20/09 avec une pluie 1,4 mm. C'est ce qui explique la baisse de la valeur de la densité de flux vers 13 heures engendrée par le recouvrement des feuilles par une couche d'eau. Le retard de la réponse du flux, survenant après environ 2 heures résulte de l'effet de l'évaporation de l'eau de pluie interceptée par le feuillage. Une fois cette eau évaporée, l'olivier reprend sa transpiration et atteint les valeurs les plus élevées de la journée en plein milieu de l'après midi.

2.6.2. Influence de l'état hydrique du sol

Au cours de la saison estivale, la demande évaporatoire élevée et les températures excessives affectent la régulation stomatique et par conséquent la transpiration de l'arbre surtout lorsque l'humidité du sol est faible. Pour caractériser la densité du flux de la sève en fonction de l'état hydrique du sol nous avons considéré des journées pendant lesquelles la parcelle à été irriguée et d'autres où les oliviers ont subit une assez longue période sans apport d'eau. Ces deux états hydriques sont représentés par les journées du 10 et 11/8/2003 **(figure 179)** qui ont lieu après une période de 5 jours d'irrigation et du 22 et 23/6/2003 **(figure 20)** qui ont lieu après une longue période (20 jours) sans apport hydrique. Les journées du 10 et 11/8 sont caractérisées par une demande climatique de 5,7mm et des températures maximales et minimales de l'ordre de 35 et 37°C et 24 et 21°C respectivement. Au cours des journées du 22 et 23/6 nous avons enregistré des valeurs élevées de l'ET_o de 6,8 et 7,4mm respectivement et des températures maximales et minimales de l'ordre de 35 et 36°C et 20 et 23°C.

La **figure 19** montre une évolution synchrone du rayonnement global et de la densité moyenne du flux, mais présentant des différences entre 9 et 16 heures au niveau de l'évolution des valeurs maximales. Le rayonnement global évolue en prenant l'allure d'une courbe en cloche

avec un maximum observé entre 11 et 13 heures alors que le maximum de la densité de flux est atteint entre 9 et 11 heures du matin. Les valeurs sont maintenues entre 3 et 4 litres/dm^2/heure jusqu'à 16 heures. Ce palier dure environ 6 heures. Le R_g entame sa phase de décroissance à partir de 14 heures alors que les densités de flux ne commencent à diminuer qu'au-delà de 17 heures.

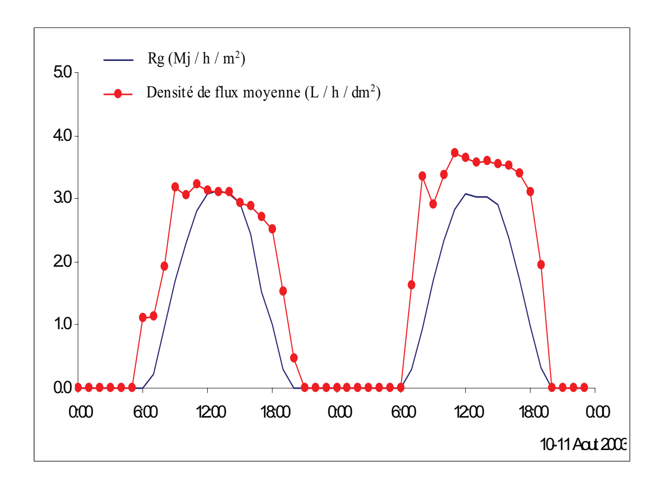


Figure 19. Valeurs horaires de la densité moyenne de flux de sève et du rayonnement global (Rg) au cours de deux journées à forte demande climatique. L'état hydrique du sol est bon suite à une période d'irrigation.

Le maintien de valeurs plus ou moins stables de la densité de flux au cours des heures de fort rayonnement résulte de l'effet d'une régulation de l'ouverture des stomates qui est effectuée par l'olivier dans le but de limiter les pertes d'eau durant les heures de forte demande évaporatoire. La présence de ce palier résulte de l'effet du stress thermique et non pas du stress hydrique. En effet les températures maximales enregistrées au cours de ces deux journées irriguées ont dépassé 35°C qui est la température seuil au dessus de laquelle l'olivier procède à la régulation stomatique.

A la suite d'une longue période sèche et pour une demande climatique importante **(figure 20)**, les valeurs de la densité de flux sont plus faibles et comprises entre 3 et 3,5 litres/dm^2 /heure. Cependant le palier est toujours présent et dure plus longtemps, environ 10 heures, et ce entre 9 heures et 18 heures.

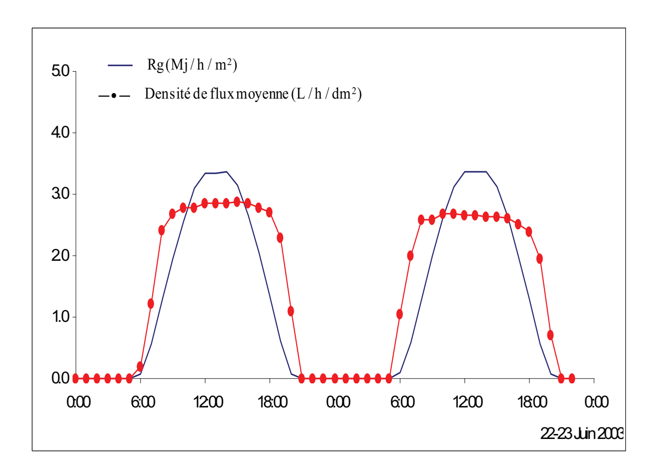


Figure 20. Valeurs horaires de la densité moyenne de flux de sève et du rayonnement global (Rg) au cours de deux journées à forte demande climatique et des conditions hydriques du sol limitantes suite à une longue période sans irrigation.

Le palier observé au niveau des densités de flux au milieu de la journée résulte de l'effet de la demande climatique élevée et l'incapacité du système radiculaire à satisfaire cette demande vu la faible teneur en eau du sol. En effet les journées du 22/6 et du 23/6 sont caractérisées par des valeurs de l'ET_o de 6,8 et 7,4 mm / jour avec des températures dépassant 35°C, c'est – à – dire la valeur à partir de laquelle la photosynthèse commence à diminuer chez l'olivier. Pour éviter l'effet néfaste de la forte demande évaporatoire et des températures élevées, l'olivier a procédé à une régulation stomatique en réduisant l'ouverture des stomates en vue de limiter les pertes d'eau au niveau de l'arbre. La

faible disponibilité de l'eau dans le sol au cours de cette période a engendré des valeurs plus faibles de la densité de flux que celles qui ont été observées au mois d'août **(figure 19).**

2.7. Evolution de la densité de flux journalier au cours de l'année

Afin d'étudier la variation de la transpiration en fonction de la demande climatique, nous avons sélectionné une trentaine de journées réparties sur toute l'année. Nous avons considéré uniquement les situations où l'état hydrique du sol est bon, à la suite de pluies ou d'irrigations. Cependant, les conditions de température et de rayonnement sont variables.

La **figure 21** représente l'évolution de la densité de flux moyenne au cours de l'année 2003 au niveau des trois arbres 1, 2 et 3. Les densités de flux des trois arbres évoluent dans le même sens. Ceci-dit, des écarts sont observés. L'amplitude des écarts entre les densités de flux des trois arbres paraissent plus élevés en été mais l'écart relatif, tenant en compte, l'importance de la demande climatique est pratiquement le même.

Les densités de flux journaliers varient entre un minimum de 5l/dm²/jour enregistré au mois de février et un maximum de 45 l/dm²/jour observé en août. La demande climatique au cours de la période de mesure varie de 0,5 à 8,6 mm/jour. La densité de flux varie peu entre le mois de mai et le mois de septembre pour des valeurs de ET_o allant de 3,5 mm/jour (Septembre) à 5,7mm/jour (Août). Cela indiquerait la présence d'un mécanisme de régulation de la transpiration malgré le bon état hydrique du sol.

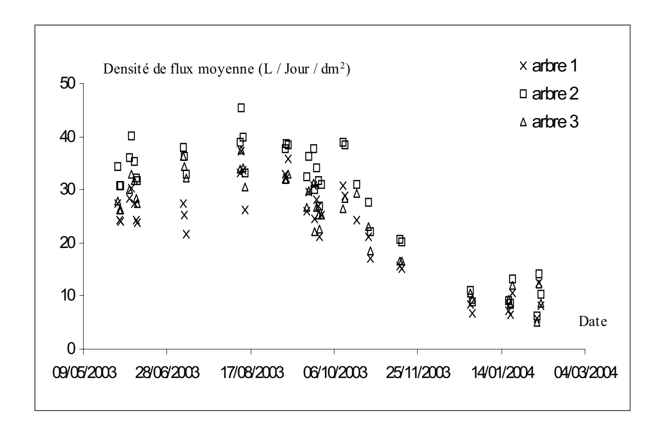


Figure 21. Evolution de la densité moyenne de flux de sève de trois jeunes oliviers de la variété Chétoui au cours de la période Mai 2003 – Mars 2004. Les données correspondent à une trentaine de jours ayant un bon état hydrique du sol et des états de température et de rayonnement variables.

Les mesures de densité de flux de sève ont été exploitées pour connaître l'ordre de grandeur de la transpiration des oliviers proprement dite. Pour ce faire, nous avons procédé à l'estimation de la section conductrice du tronc et qui reportée dans le paragraphe suivant.

2.8. Détermination de la section conductrice de l'eau

La section conductrice a été déterminée par coloration à la safranine de sections de rameaux de diamètres allant de 1 à 7 cm. La **photo 4** montre une coupe transversale d'un rameau coloré à la safranine montrant ses différentes structures. Le bois conducteur est coloré en rose.

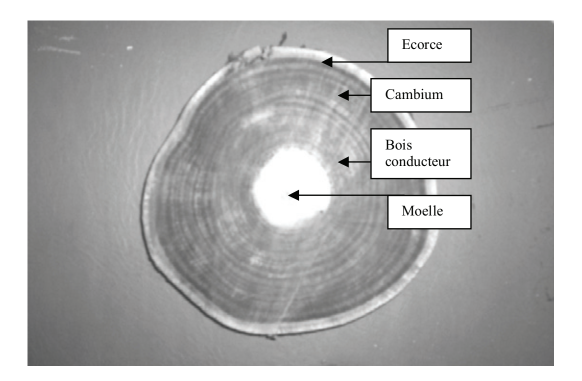


Photo 4. Coupe transversale d'un rameau d'olivier de 5 cm de diamètre après coloration à la Safranine Orange. De l'extérieur vers l'intérieur : l'écorce colorée en vert brun, le bois conducteur en rouge avec alternance de cernes claires et foncées et la moelle au centre, claire. Le cambium est représenté par un anneau rouge foncé placé entre l'écorce et le bois conducteur.

La section du bois conducteur (S_c, cm^2) a été déterminée au moyen du logiciel Arc-view. Les valeurs obtenues ont été corrélées à la section totale du rameau (S_t, cm^2) pour différents diamètres allant de 1.5 à 7 cm **(figure 22).** Cette corrélation est exprimée par **l'équation 5**.

$$S_c = 0{,}798\ S_t + 0{,}2383 \qquad r = 0{,}99 \qquad [5]$$

Le diamètre du tronc moyen de la parcelle en 2003, est de 12 cm. La section totale moyenne du tronc est donc de 1,13 dm^2. La section conductrice estimée par la corrélation déterminée à partir des essais de coloration est de 0,906 dm^2. Pour des densités de flux de sève allant de 5 à 45 litres /dm²/jour, le flux de sève journalier varierait donc au cours de l'année entre 5 et 41 litres/jour.

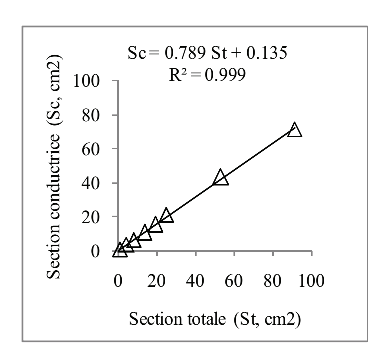


Figure 22. Relation entre la section totale du rameau (cm^2) d'olivier et la section du bois conducteur de la sève (cm^2).

2.9. Valeurs de la transpiration et de T / ET_o

La transpiration moyenne d'un arbre, estimée par la mesure du flux de sève (F, litre $jour^{-1}$) varierait au cours de l'année entre 5 et 41 litres/jour. Pour rapporter cette estimation à l'échelle de la parcelle nous avons considéré la surface dédiée à un olivier compte tenu de la densité de plantation soit 36 m^2. Nous avons divisé la transpiration par cette surface. Ainsi pour des consommations journalières minimale de 5 litres/jour et maximale de 41 litres/jour, nous obtenons des valeurs de 0,14 mm/jour pour la valeur minimale et de 1,14 mm/jour pour la valeur maximale, correspondant à des valeurs de ET_o moyennes de 1,5 mm pour le mois de février et de 5,7 mm pour le mois d'août. Le rapport T/ET_o représentant le coefficient cultural de base K_{cb}, donc la transpiration, varie de 0,09 à 0,20. Ceci veut dire que la transpiration maximale est de l'ordre de 20% ET_o.

3. Besoins en eau d'irrigation de jeunes oliviers

L'évapotranspiration de la culture déterminée par la méthode de la FAO est exprimée en fonction de l'évapotranspiration de référence Penman-Monteith (ET_o) (Allen et al., 1998), du coefficient cultural K_c et

du coefficient de réduction K_r relatif au pourcentage de couverture du sol par la végétation **(Equation 6).**

$$ET_c\ (mm) = ET_o\ (mm) * K_c * K_r \quad [6]$$

L'utilisation de ce coefficient K_r est suggérée pour le cas des plantations d'olivier où le taux de couverture du sol est inférieur à 60%. Ce paramètre varie de 1,0 à 0,7 lorsque le % de sol couvert va de 60% à moins de 30%.

Pour tenir compte de la hauteur des arbres, qui varie sensiblement dans le cas de jeunes arbres, Allen et al., (1998) proposent d'exprimer K_c tel que indiqué dans **l'équation 7.**

$$K_c = K_{c\ min} + (K_{c\ full} - K_{c\ min})\ min\ (1, 2f_c, (f_c^{\ (1/1+h)}))\quad [7]$$

Avec $K_{c\ min}$ le coefficient cultural minimum (0,2), $K_{c\ full}$ le coefficient cultural correspondant à une couverture totale du sol (0,65), f_c est la fraction du sol couverte ou ombragée par la frondaison et h est la hauteur de l'arbre.

Au cours des premières années de culture, la couverture du sol ainsi que le taux de son occupation par les racines sont faibles mais varient considérablement en fonction de l'âge et de la saison en raison de la variation du volume de la canopée (LAI). De ce fait, l'approche de la F.A.O. (Allen et al., 1998) ne peut pas être appliquée directement. Des valeurs spécifiques de Kc doivent être utilisées pour tenir compte de ces aspects. Le système radiculaire, peu développé pendant les premières années, pose le problème de la pluie efficace pour le calcul des besoins en eau d'irrigation. Le modèle de calcul doit ainsi tenir compte de la couverture du sol et du développement radiculaire (Masmoudi et al., 2007).

Les quantités d'eau délivrées par olivier au cours de la période d'expérimentation sont rapportées dans le **tableau 8, Partie C**. Pour les adapter à d'autres sites, il est nécessaire de développer une relation entre

l'eau apportée, la demande climatique, la surface du sol couverte par la frondaison et celle qui est exploitée par les racines.

La surface de sol explorée par le système radiculaire (S_{racine}) au cours des 6 premières années de culture a varié de 3,8 à 13,8 m^2. En supposant que les quantités d'eau délivrées par l'irrigation (I) sont apportées dans des cuvettes aménagées au voisinage de l'olivier, l'eau s'étendra sur une surface maximale égale à S_{racine} qui garantisse son accessibilité aux racines. Sur cette même surface est interceptée une quantité de pluie (P^*) assimilée à la pluie efficace, définie comme étant la quantité de pluie qui s'infiltre dans la zone radiculaire et disponible à la plante, P^* s'écrit selon **l'équation 8** comme suit:

$$P^* (m^3) = P (m) * S_{racine} (m^2) \quad [8]$$

Le volume d'eau évapotranspiré par arbre (ET*) peut être estimé par **l'équation 9** en se rapportant à la surface exploitée par les racines (S_{racine}) tel que :

$$ET^* (m^3) = K_c * ET_o (m) * S_{racine} (m^2) \quad [9]$$

Afin de lier les quantités d'eau délivrées à la demande évaporatoire, on définit le coefficient K_o qui prend en compte seulement les quantités d'eau attribuées à l'olivier, il est définit par **l'équation 10**:

$$K_o = (P^* + I) / ET^* \quad [10]$$

Ce coefficient peut être assimilé pour une jeune culture au coefficient cultural lorsque les besoins en eau sont déterminés à partir des quantités de pluie et d'irrigation interceptées au niveau de la zone radiculaire comme définies par les équations précédentes. Ce rapport peut être adopté comme moyen pour estimer les besoins en eau d'irrigation dans d'autres sites et pour différents régimes pluviométriques et évapotranspiratoires.

Pour évaluer l'approche de calcul des besoins en eau, nous avons calculé puis comparé les valeurs du coefficient cultural tel que proposé par la FAO et selon les équations précédentes. Les valeurs ainsi déterminées sont présentées dans la **figure 23.**

Les résultats montrent de faibles rapports I/ET_o durant la saison d'irrigation qui augmentent de 0,02 à 0,14 pour des oliviers âgés de 1 à 6 ans. Par contre, lorsque les quantités d'eau utilisées sont rapportées à la surface du sol exploitée par les racines, les valeurs de Kc (I* / ET*) se rapprochent de celles de la FAO (K_c-FAO). Les valeurs calculées (P*+I*/ ET*) en incluant la pluie efficace telle que nous l'avons présentée, fournit des valeurs fluctuantes du coefficient cultural. Ceci montre dans notre cas la limite de la méthode de la FAO puisque la valeur de K_c que nous avons considérée notamment à la sixième année (0,38) est plus élevée que celle qui est calculée en se référant à la surface exploitée par les racines et qui est impliquée dans la transpiration de l'arbre, qui ne représente en fait que 20% de l'évapotranspiration de la culture. D'où l'intérêt de la méthodologie développée. Enfin les besoins en eau d'irrigation peuvent être estimés à partir de **l'équation 11** :

$$I\ (m^3) = K_o * ET^* - P^* \quad [11]$$

avec ET* et P* l'évapotranspiration de la culture et la pluviométrie efficace rapportées à la surface exploitée par le système radiculaire.

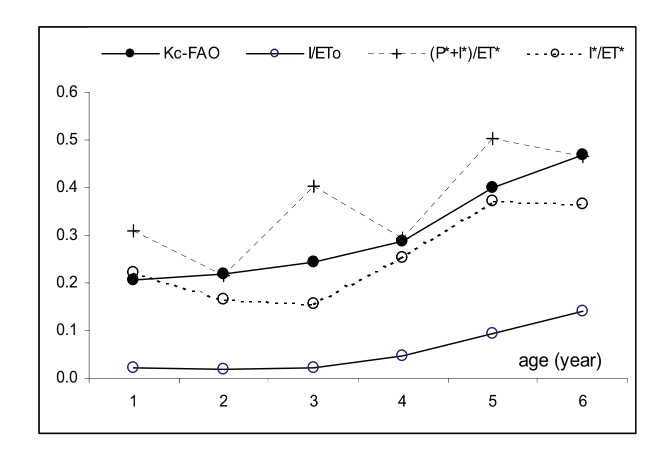


Figure 23. Variation de K_c-FAO et des rapports (I /ET_o), (P*+I* / ET*) et de (I*/ET*) calculés durant la période avril-août au cours des six années d'expérimentation à Mornag.

DISCUSSION

La caratérisation de la croissance de l'olivier au cours des six premières années de culture a montré que la croissance de l'arbre est influencée par la demande climatique, la température et le niveau de satisfaction des besoins en eau.

Pour déterminer les besoins en eau de la culture ou consommation en eau des jeunes arbres nous avons utilisé trois approches : climatique (FAO, 1998), hydrologique et physiologique en vue d'estimer l'évapotranspiration des jeunes arbres et leur transpiration par la mesure de la sève brute.

L'étude de la dynamique de l'eau a été réalisée moyennat un suivi du stock d'eau dans le sol qui a été estimé à partir de mesures gravimétriques et neutroniques après étalonnage de la sonde à neutrons. En raison de l'hétérogénéité spaciale de la couverture du sol, du développement radiculaire et de la pratique de l'irrigation localisée nous avons considéré au voisinage de l'olivier quatre compartiments au niveau desquels l'humidité évolue dans le même sens et qui sont soumis à l'effet de différents processus évaporatoires et physiologiques. Les mesures et profils effectués sous la frondaison des oliviers caractérisent la zone affectée par l'irrigation et soumise à l'activité des racines et donc à la transpiration de la culture. La zone située à la limite de la zone des racines est sujette à l'effet de la pluie mais également à l'évaporation à partir du sol et à l'activité radiculaire. En dehors de ces deux zones, le sol est soumis à l'effet de la pluie et à l'évaporation directe du sol mais dans des proportions différentes selon la distance qui les sépare du tronc.

Le stock d'eau du sol a été caractérisé au niveau de ces quatre compartiments en considérant des situations types : à la suite d'une pluie abondante, en période d'irrigation et après une période de dessèchement du sol en l'absence d'apports hydriques. Les résultats ont montré :

i) Après une période avec des pluies abondantes, le nuage de points est plutôt ramassé. L'humidité est élevée dans les quatre zones et varie entre 35 et 40%. Les quatre réservoirs semblent être homogènes.

ii) En l'absence d'apport d'eau par pluie ou par irrigation le sol entre dans une phase de dessèchement et l'humidité au niveau des réservoirs G4 et G1 est alors plus faible que pour les autres réservoirs intermédiaires G2 et G4. Lorsque la période dessèchement s'allonge l'écart entre les réservoirs se creuse et l'humidité du sol est la plus faible dans le réservoir G3 suivi de G1 et de G2.

iii) A la suite d'une irrigation, l'humidité augmente au niveau du réservoir G1. Elle se maintien à des niveaux élevés allant de 30 à 40 % tout au long de la période d'irrigation.

A l'échelle de l'année, les stocks d'eau évoluent entre avril et décembre avec une tentence à la baisse jusqu'à l'arrivée des pluies de l'automne qui engendrent une augmentation importante des stocks au niveau des 4 groupes et l'homogénéisation de l'état du sol. Cependant, des écarts sont observés au cours de la saison d'irrigation entre les 4 compartiments qui résultent de l'apport localisé de l'eau et de l'importance relative du processus d'évaporation au niveau de chaque réservoir.

Les stocks observés au niveau du groupe 4 sont les plus faibles en période estivale en raison de l'absence d'apports hydriques et de l'effet de l'évaporation directe du sol mais ils dépassent tous les groupes en période de pluie à cause de l'absence d'absorption radiculaire dans cette zone qui n'est soumise qu'à l'effet de la pluie et de l'évaporation du sol. Au contraire, le groupe 1 (sous frondaison) présente les valeurs les plus élevées entre mi mai et début septembre en raison des apports hydriques par l'irrigation. Le sol est dans ce cas couvert par la canopée et n'est pas directement affecté par le rayonnement solaire, mais par la transpiration de l'arbre. Il n'est donc pas soumis à la même demande évaporatoire. Les groupes G3 et G2 présentent des valeurs intermédiaires du fait qu'ils bénéficient d'un ombrage partiel en cours de journée, réduisant la composante évaporation du sol. Ils sont toutefois différenciables en raison de la présence de racines au niveau de G2, qui implique une absorption d'eau mais qui est absente pour le groupe 3.

L'évolution du stock d'eau examinée de manière globale à l'échelle de la campagne est sous l'influence des évènements pluvieux, l'irrigation

et l'évaporation du sol, mais telle que présentée elle ne fait pas apparaître l'effet de l'activité de la plante et la modalité de fonctionnement du réservoir sol lorsqu'il est placé sous différentes conditions hydriques.

Le fonctionnement du réservoir sol au niveau des différents compartiments étudiés est analysé selon une composante verticale, en considérant trois dates caractérisées par des conditions climatiques différentes (sec, irrigué et après pluie). La date du 29/5/2003 (sec) correspond du point de vue phénologique au stade de nouaison et de croissance rapide du fruit. La date du 16/7/2003 se situe en pleine période d'induction florale. La date du 23/09/03 correspond à la période du grossissement du fruit. Pour ces différentes dates, le fonctionnement du réservoir sol est analysé au niveau des 4 groupes.

Les résultats montrent que les variations les plus importantes de l'humidité du sol sont observées au niveau de la tranche 0-40 cm dans toutes les situations en raison de l'intervention à ce niveau de différents processus évaporatoires et physiologiques et de la répartition hétérogène des apports hydriques par la pluie et l'irrigation.

Sous la frondaison, l'évolution de l'humidité du sol est comparable à celle qui est observée en période de pluie du fait que la surface est continuellement humectée au cours de l'irrigation. Les pertes d'eau occasionnées dans ce cas par la demande climatique élevée du mois de juillet semblent être correctement couvertes. Au contraire, lorsque le sol est soumis à une longue période sans apport de l'eau sous une demande climatique modérée à élevée, les humidités en surface diminuent considérablement et atteignent des valeurs voisines des humidités critiques en raison de son dessèchement au niveau de la tranche de sol 0-40 cm. La baisse de l'humidité en surface résulte dans ce cas de l'absorption par les racines et de l'évaporation à partir du sol.

Au niveau de la zone intermédiaire hors frondaison, le réservoir sol se comporte comme précédemment en période de pluie, mais dans ce cas les humidités de surface les plus faibles ne sont pas observées au mois de mai en période sèche mais au cours d'une journée irrigué en raison de sa position. A ce niveau (zone comportant des racines, à 2m du tronc), le sol n'est pas humecté par l'irrigation, ne bénéficie que d'un ombrage partiel

et il est soumis à une demande évaporatoire plus élevée que sous la frondaison.

En dehors de la zone explorée par les racines (G3 et G4), l'humidité du sol est élevée dans les quatre réservoirs en période de pluie. En été cette humidité est faible dans les réservoirs 2 et 3. Dans le cas du groupe 4 le profil S est déplacé davantage vers la profondeur du sol. Les humidités de surface ne sont pas dans ce cas aussi les plus faibles en période sèche mais au cours de la journée irriguée. En effet, le profil I présente les humidités les plus faibles au niveau de tous les horizons en raison de l'augmentation de la demande évaporatoire non compensée par des apports hydriques à ce niveau.

Il apparaît donc, qu'en période de pluie, l'humidité du sol évolue de manière comparable pour les 4 groupes en raison de l'homogénéisation de l'état du sol. La situation est différente en période d'irrigation. L'humidité du sol au cours d'une journée avec irrigation (profil I) présente au niveau des groupes 2, 3 et 4 (en dehors de la frondaison) des humidités en surface plus faibles que celles qui sont observées au cours d'une journée du mois de mai (profil S) prise après une longue période sans apport hydrique. Ceci résulte de l'effet de la demande climatique qui est plus élevée en juillet qu'en mai. La région du sol située en dehors de la frondaison et en dehors de celle-ci est exposée à l'évaporation directe. Sous la frondaison (G1), l'humidité en surface est proche de celle qui est observée en période de pluie en raison de l'irrigation qui a permis de contrebalancer la demande climatique et répondre au besoin en eau des jeunes oliviers.

Ces résultats concordent avec ceux de Fernandez et Moreno (1999) et Abid-Karray (2006) qui ont rapporté cette hétérogénéité de l'état hydrique du sol autour de l'olivier, liée au développement de ses racines et à la discontinuité de la couverture du sol, engendrant une interception différente du rayonnement solaire. En dehors de la frondaison, l'olivier peut puiser dans le réservoir du sol nu si son système radiculaire le permet. Dans notre cas le développement limité des racines à 2m du tronc n'a pas permis l'approvisionnement des réservoirs hors frondaison en

période estivale. C’est ce qui explique les faibles humidités observées en surface au mois de juillet même sous irrigation.

Compte tenu de cette variabilité spaciale du réservoir sol, il est difficile de déterminer la consommation réelle de l’olivier à partir du bilan hydrique. Outre les transferts verticaux liés aux différents processus évaporatoires, Abid-Karray (2006) signale aussi la présence de tranferts hydriques latéraux, qui remdent la situation encore plus complexe. De même, comme il s’agit d’une plantation arboricole et plus particulièrement d’une jeune plantation où la couverture du sol est partielle et encore faible, la consommation en eau telle que déterminée par la méthode recommandée par la FAO ne reflète pas la consommation de l’arbre, mais intégre la composante évaporation du sol. Pour déterminer la transpiration du jeune olivier nous avons entrepris des mesures du flux de la sève brute en utilisant la technique de Granier (1987) modifiée par Do et Rocheteau (2002a et b).

Pour mesurer le flux de la sève, nous avons installé au cours de l’année 2003 un dispositif expérimental constitué de 10 capteurs (types INRA et Dynamax), et que nous avons insérés sous l’écorce du tronc de trois oliviers Chétoui, à environ 40 cm au dessus du niveau du sol selon les orientations Nord, Sud-est et ouest. Ces capteurs sont chauffés par intermittance (30 mn de chauffage et 30 mn de non chauffage) afin d’éliminer l’effet du gradient naturel.

Les signaux produits par les deux types de capteurs sont enregistrés au niveau d’un data logger puis traités en adoptant la procédure de calul développée par Do et Rocheteau (2002a et b).

Les résultats ont montré que les signaux obtenus au niveau des différents capteurs, INRA ou Dynamax, évoluent de manière synchrone entre une valeur minimale enregistrée à la fin de la période froide et une valeur maximale observée à la fin de la période de chauffage. Cependant, une différence de comportement est observée entre le jour et la nuit, matérialisée par la présence d’un palier maximal et d’un palier minimal au cours des heures diurnes et seulement d’une valeur maximale et minimale durant la nuit. La présence de ce palier est expliquée par la rapidité de changement de température au cours de la journée au niveau

des sondes du capteur qui résulte du passage de la sève sous l'effet de la demande évaporatoire. Ces résultats sont conformes à ceux rapportés par Do et Rocheteau (2002a et b), Mahjoub (2004) et Abid-Karray (2006) qui donnent des valeurs de signaux comparables et avec la même dynamique, en dépit d'un régime de chauffage différent. L'adoption d'un chauffage alternatif de 30 mn est correcte mais produit seulement une seule mesure à l'heure.

A partir de ces signaux nous avons calculé la densité de flux selon la méthode décrite par Do et Rocheteau. Au terme de cette procédure de calcul, des valeurs horaires de la densité de flux sont obtenues. La représentation graphique de ces valeurs en fonction du temps montre des variations entre les capteurs et les arbres au niveau desquels ils sont insérés, mais également en fonction de la saison, du stade phénologique, de l'orientation du capteur et des conditions climatiques et hydriques. Ces résultats concordent bien avec ceux de Granier (1987), Do et Rocheteau (2002), Mahjoub (2004) et Abid-Karray (2006) qui ont montré que le flux de la sève dépend d'une multitude de facteurs parmi lesquels, les caractéristiques de l'arbre et du capteur lui-même, mais surtout de la demande climatique et de l'état hydrique du sol.

A l'échelle de la journée, la densité du flux varie considérablement, mais elle suit globalement l'évolution de R_g. Elle évolue dans le même sens mais avec des proportions variables selon l'heure de la journée.

L'analyse des données relatives à l'évolution du flux à l'échelle de la journée montre que d'une manière générale le flux de sève augmente rapidement le matin à partir de 6 heures en été et 8 heures en hiver et évoluent au cours de la journée en dessinant une courbe en cloche, qui s'aplatit au cours des journées à forte demande évaporatoire, donnant un palier d'une durée plus ou moins longue selon l'importance de la contrainte. La chute des valeurs observée au cours des journées à forte demande, au milieu de la journée, correspond à une fermeture partielle des stomates pour limiter les pertes d'eau, alors que les valeurs de rayonnement continuent à augmenter. Après ce maximum ou ce palier selon le cas, les valeurs de flux diminuent rapidement jusqu'à 17 heures en hiver et 20 heures en été pour se stabiliser autour d'une valeur

minimale la nuit. En absence d'ajustement stomatique ou de passages nuageux, la valeur maximale de la journée est observée entre 11 heures et 14 heures selon le capteur et la saison. Ce résultat concorde avec la description produite par Abid-Karray (2006).

Cependant, des variations importantes sont observées. La position du capteur sur le tronc constitue une première source de variations. En effet, au niveau du même tronc, différentes valeurs de densité sont obtenues avec le même type de capteur. Ce résultat a été déjà obtenu par Lu (1987) et Abid-Karray (2006) qui ont décelé la présence d'une variabilité azimutale au niveau d'un même arbre sans toutefois préciser une orientation de prédilection. Cette variabilité du flux en fonction de la direction indique que l'effet de l'orientation du capteur est aléatoire et que les valeurs de la densité de flux dépendent plutôt du système de conduction de l'eau au niveau de chaque arbre. Ces résultats corroborent ceux de Nicolas et al., (2005) qui attribuent la similarité des valeurs de flux obtenues pour deux orientations données à une uniformité de distribution des vaisseaux conducteurs. Par conséquent, cette variabilité trouve son origine dans l'hétérogénéité du système de conduction de la sève. La sectorisation des échanges hydriques permet d'expliquer en partie cette hétérogénéité. Dans les cas les plus marqués un secteur déterminé communiquerait d'une part avec une portion de la couronne de l'arbre et d'autre part avec une racine ou un faisceau radiculaire (Connor et Fereres, 2005). Les capteurs insérés au niveau des vaisseaux conducteurs peuvent être reliés à une partie de la frondaison plus ou moins importante.

Le type de capteur constitue une deuxième source de variation, mais qui n'apparaît que pour des valeurs seuils au-dessus de laquelle les réponses produites par les capteurs INRA et Dynamax sont différentes.

La densité de flux est également influencée par la demande climatique et l'état hydrique du sol qui sont les principaux facteurs de variation. Pour analyser la réponse du jeune olivier, nous avons considéré des journées types caractérisées par des conditions environnementales différentes : journées pluvieuses ou après une pluie abondante, journées

avec une demande évaporatoire faible, modérée ou élevée, journée avec et sans irrigation.

L'analyse de ces cas a montré que la densité de flux suit globalement celle du rayonnement dans toutes les situations. Pour des valeurs élevées de R_g on a des valeurs importantes de la densité de flux. Les différences apparaissent en présence de pluie ou d'une forte demande évaporatoire. Dans le premier cas, un déphasage se produit entre R_g et le flux. L'humectation des feuilles par un film d'eau de pluie au cours de la journée engendre une réponse décalée par rapport à celle de R_g. Le retard de la réponse du flux survenant après quelques heures résulte de l'effet de l'évaporation de l'eau de pluie interceptée par le feuillage. Une fois cette eau évaporée, l'olivier reprend sa transpiration à un niveau aussi important. Ceci n'est possible que si le réservoir sol est convenablement pourvu en eau pour permettre un niveau de transpiration élevé. Dans le cas contraire une baisse des valeurs de la densité de flux est observée pendant les heures de fort rayonnement, matérialisée par la présence d'un palier dont la durée dépend de l'état hydrique du sol. En période d'irrigation, les valeurs maximales de la densité de flux sont de l'ordre de 3 litres $dm^{-2}\ h^{-1}$ pour une demande climatique de 3 Mj $m^{-2}.h^{-1}$. En période sèche les valeurs descendent à 2,5 litres $m^{-2}\ h^{-1}$ pour la même valeur du rayonnement global. Cette diminution résulte de la régulation stomatique qui permet de réduire les pertes d'eau. L'olivier, sous une contrainte hydrique ou thermique, déclenche une régulation de l'ouverture de ses stomates dans la matinée. Cette limitation de la transpiration couvre toutes les heures de forte demande climatique. Ces résultats sont en parfait accord avec ceux de Mahjoub (2004) et de Abid-Karray (2006). Le niveau de régulation varie toutefois selon le niveau de la contrainte, l'état hydrique de la plante pendant cette période, la variété et ses caractéristiques foliaires.

Pour déterminer la valeur du flux de la sève à partir de ces densités nous avons procédé à la détermination de la section conductrice de l'eau et à l'étalonnage des capteurs en vue de les calibrer en tenant compte de nos conditions expérimentales. Ces expérimentations ont été réalisées au laboratoire de Bioclimatologie de l'INAT et ont abouti à l'élaboration

d'une première équation reliant la section totale du rameau à la section conductrice de l'eau. Cette dernière est identifiée par sa couleur rouge, caractéristique de la safranine orange que nous avons utilisée pour colorer spécifiquement les tissus conducteurs. Cette relation a montré que pour des diamètres de rameaux compris entre 1 et 7 cm, 80% de la section est constituée de bois conducteur.

Compte tenue de cette variabilité et afin d'estimer le flux moyen sur olivier en vue de déterminer la transpiration à l'échelle de la parcelle nous avons adopté la méthode de Giorio et Giorio (2003) qui ont comparé le flux moyen mesuré sur un arbre donné au flux moyen calculé pour l'ensemble des arbres. Dans notre cas et comme le flux de la sève mesuré par arbre est corrélé avec la moyenne des 3 arbres, l'extrapolation des résultats de l'arbre vers l'ensemble de l'olivette est possible. Dès lors, on peut considérer la transpiration de l'olivier comme égale au flux moyen de l'olivette représenté par la moyenne arithmétique des flux mesurés sur les 3 arbres alors que la transpiration de l'olivette ($T_{Olivette}$) sera égale à la transpiration moyenne des 3 arbres, rapportée à la surface utile d'un arbre.

Ainsi, le flux de la sève à l'échelle de l'arbre (F,litre/jour) ou transpiration moyenne de l'arbre a été déterminé en multipliant la valeur de la densité du flux de la sève (u, litre dm^{-2} $jour^{-1}$) par la section conductrice moyenne (S_c, dm^2). Cela nous a permis d'estimer la transpiration au niveau de la parcelle (T, mm) en divisant les valeurs moyennes de la transpiration par la surface utile de l'olivier, égale à 36 m^2. Pour des consommations minimale de 5 l/jour et maximale de 41 l/jour, nous obtenons des valeurs journalières de 0,14 mm pour la valeur minimale et de 1,14 mm pour la valeur maximale, correspondant à des valeurs de ET_o moyennes de 1,5 mm pour le mois de février et de 5,7 mm pour le mois d'août.

Compte tenu de l'évolution synchrone entre la densité de flux et le rayonnement global, nous avons cherché à estimer le rapport T/ET_o représentant le coefficient cultural K_c. Dans ce cas, la valeur de T/ET_o représentant le coefficient cultural de base Kcb qui est relatif à la transpiration de la culture. Il est égal à 0,09 et 0,20 respectivement pour

les deux situations considérées. Ceci veut dire que la transpiration des jeunes arbres ne représente que 20% de l'évapotranspiration dans les meilleurs cas.

L'intégration de l'ensemble des résultats relatifs au développement du jeune olivier et à la gestion de l'irrigation nous a permis de développer un modèle de calcul de l'évapotranspiration de l'arbre en nous basant sur la surface du sol exploitée par le système radiculaire au cours des six années de culture.

Les résultats montrent de faibles rapports I/ET_o durant la saison d'irrigation qui augmentent de 0,02 à 0,14 pour des oliviers âgés de 1 à 6 ans. Par contre, lorsque les quantités d'eau utilisées sont rapportées à la surface du sol exploitée par les racines, les valeurs de K_c (I*/ET*) se rapprochent de celles de la FAO (K_c-FAO). Les valeurs de K_c calculées en incluant la pluie efficace (P*+I*/ET*) telle que nous l'avons présentée, fournit des rapports fluctuants du coefficient cultural. Ceci montre dans notre cas la limite de la méthode de la FAO puisque la valeur que K_c que nous avons considérée notamment à la 6ième année (0,38) est plus élevée que celle qui est calculée en se référant à la surface exploitée par les racines et qui est impliquée dans la transpiration de l'arbre, qui ne représente en fait que 20% de l'évapotranspiration de la culture.

L'utilisation de cette approche pour conduire l'irrigation au niveau de la jeune plantation d'olivier en appliquant les doses et fréquences indiquées semble être adéquate. Elle a permis un bon développement des jeunes arbres et une croissance vigoureuse comme il a été observé dans les chapitres précédents. L'application de cette approche au niveau d'autres régions et pour d'autres systèmes de conduites permettra de gérer plus efficacement l'irrigation des plantations d'olivier puisque le calcul des besoins en eau ciblera l'arbre. D'ailleurs, il est plus approprié dans de ce cas de considérer les apports d'eau à l'échelle de l'individu en unité de volume (litre, m^3) par arbre que de la parcelle (valeur en mm) en raison de la discontinuité de la couverture du sol, de la répartition hétérogène des racines et de l'humectation d'une zone limitée du sol au moment de l'irrigation.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est la caractérisation de la dynamique de croissance de l'olivier Cvs. Chétoui, Meski, Picholine et Manzanille au cours des premières années de culture en rapport avec leur alimentation en eau dans le but de la modélisation.

La caractérisation de la croissance du jeune olivier a été réalisée en considérant l'arbre en tant qu'unité intégrée dans un système sol - plante - climat dans lequel les relations entre la croissance du jeune arbre, la température, la demande climatique et l'eau ont été investiguées. La relation jeune olivier - sol a été abordée dans le but de développer une approche méthodologique permettant de déterminer les besoins en eau de la culture pendant les premières années d'exploitation, en combinant l'approche climatique, physiologique et hydrologique. La démarche adoptée repose sur une quantification de l'évapotranspiration des jeunes oliviers à partir :

(1) du bilan hydrique en considérant différents compartiments du réservoir sol au voisinage de l'olivier en raison de la discontinuité de la couverture du sol, de l'hétérogénéité du développement du système radiculaire et de la pratique de l'irrigation localisée. Les résultats ont montré que l'humidité du sol au niveau de ces 4 compartiments varie considérablement en fonction de la distance du tronc, de la saison et de la fréquence des irrigations. Sous la frondaison, le sol est sous l'influence de l'irrigation, de la pluie effective et de la transpiration de l'olivier. Son humidité est plus élevée en période d'irrigation.

(2) de la méthode de la FAO (1998) pour les conditions non-standards en raison de la discontinuité du couvert végétal. Les valeurs de ET_c sont calculées en adoptant les coefficients K_c et K_r recommandés dans le Bulletin n°56 de ET_o Penman-Monteith. L'ET_c ne représente pas uniquement la part de l'eau relative à la transpiration mais intègre l'évaporation du sol qui est importante dans ce cas en raison du faible taux de couverture du sol par la biomasse végétale. Ces valeurs sont

élevées et n'ont pas été appliquées. Les quantités d'eau fournies sont beaucoup plus faibles que les valeurs calculées.

(3) de la mesure du flux de la sève brute en vue d'estimer la contribution de la composante transpiration dans l'évapotranspiration des jeunes arbres. La méthode utilisée est celle de Granier (1987) modifiée par Do et Rocheteau (2002). Les résultats ont montré que la transpiration maximale de l'olivier de 6 ans représente 20% ETo. La mesure du flux de sève permet ainsi une estimation précise de la transpiration.

L'intégration de l'ensemble des résultats nous a permis de développer un modèle de calcul des besoins en eau d'irrigation des jeunes oliviers en rapport avec la demande climatique et le développement des parties aérienne et souterraine.

-L'étude de la relation sol-plante a été réalisée dans le but de déterminer la consommation des jeunes arbres et ses facteurs de variations. Il ressort de cette étude qu'il est d'abord indispensable d'intégrer au moins deux méthodes de calcul de l'évapotranspiration en raison de la discontinuité du couvert végétal et de la répartition hétérogène des racines. La méthode de mesure du flux de la sève permet une estimation précise de la transpiration. Pour de jeunes oliviers de 6 ans, elle est estimée à 20%ET_o. Elle est beaucoup plus faible que ET_c-FAO qui intégre les deux composantes : transpiration de l'arbre et évaporation du sol. Pour pouvoir utiliser cette méthode et disposer d'une valeur correcte de ET_c, nous suggérons de considérer la méthode de la FAO au niveau de l'arbre c'est-à-dire rapporter le calcul de ETc à la surface du sol utilisée par les racines.

- L'utilisation de cette approche pour conduire l'irrigation au niveau de la jeune plantation d'olivier en appliquant les doses et fréquences indiquées semble être adéquate. Elle a permis un bon développement des jeunes arbres. Son extension vers d'autres régions et pour d'autres systèmes de conduites permettra de gérer plus efficacement l'irrigation des plantations d'olivier puisque le calcul des besoins en eau ciblera l'arbre pris en tant qu'individu et non pas l'ensemble du verger. D'ailleurs, il est plus approprié dans de ce cas de considérer les apports d'eau à l'échelle de l'individu en unité de volume (litre, m^3) par arbre

que de la parcelle (valeur en mm) en raison de la discontinuité de la couverture du sol, de la répartition hétérogène des racines et de l'humectation d'une zone limitée du sol au moment de l'irrigation. Ainsi il sera possible d'étendre l'approche développée pour le calcul des besoins en eau de l'olivier à d'autres conditions culturales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abid-Karray, J., 2006. Bilan hydrique d'un système de cultures intercalaires (Olivier – Culture maraîchère) en Tunisie Centrale : Approche expérimentale et essai de modélisation. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II. 172 pages.

Allen, G., S. Pereira, D. Raes et M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration. Guideline for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper 56. FAO. Rome.

Bandino, G. et S. Dettori, 2003. Manuale di olivicultura. Consorzio Interprovinciale per la Frutticoltura Cagliari. Oristano. Nuoro. Regione Autonoma della Sardegna.

Ben Mechlia, N. et A. Hamrouni, 1978. Alternance et production potentielle chez l'olivier irrigué. Séminaire International sur l'olivier et autres plantes oléagineuses cultivées en Tunisie. Mahdia. 3-7 Juillet 1978. pp. 199-208.

Bonachela, S., F. Orgaz, F.J. Villalobos et E. Fereres, 1999. Measurement and Simulation of evaporation from soil in olive orchards. Irrig. Sci. 18: 205-211.

Bonji, G. et A. Palliotti, 1994. Olive in Hand book of environmental physiology of fruit crop. Eds. B. Schaffe and P.C., Anderson CRC Press Inc. 165-187.

Boulouha, B., 1986. Croissance, fructification et leur interaction sur la production chez la Picholine Marocaine, Olea 17 : 41-47.

Cabibel, B., 1991. Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. III. Influence sur les flux de sève des modalités d'apport d'eau en irrigation localisée sur sol fissuré. Agronomie 11 : 877-887.

Cabibel, B. et F. Do, 1991a. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des

mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. Agronomie 11: 669-678.

Cabibel, B. et F.Do, 1991b. Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. II. Evolution dans le temps des flux de sève et comportement hydrique des arbres en présence ou non d'une irrigation localisée. Agronomie 11 : 757-766.

Caspari, H.W., S.R. Green et W.R.N. Edwards, 1993. Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse and estimated by a Penman-Monteith model. Agric. For. Meteorololy. 67, 13-27.

Clothier, B.E. et S.R. Green, 1994. Root zone processes and the efficient use of irrigation water. Agric. Water Management. 25 : 1-12.

C.O.I., 1997. 'L'olivier', C.O.I., 1997. Encyclopédie Mondiale de l'Olivier, Ed. Plaza and Janéf F.A., 479 p.

Cohen, Y., 1991. Determination of orchard water requirement by a combined trunk sap flow and meteorology approach. Irrig. Sci., Vol 12, pp 93-98.

Connor, D.J. et E. Fereres, 2005. The Physiology of adaptation and yield expression in Olive. Horticultural Review, Volume 31, Edited by Jules Janick.

Cottenie, A., M. Verloo, L. Kiekens, R. Camerlynck, G. Velghe et A. Dhaese, 1983. Essential and non essential trace elements in the system soil – water - plant. Laboratory of analytical and agrochemistry state university. Gent-Belgium. 217 pages.

Cruiziat, P. et M.T. Tyree, 1990. La montée de la sève dans les arbres. La Recherche, N°220.

Cruz-Conde Suarez de Tangil, J. et M. Fuentes-Cabanas, 1989. Irrigation goutte à goutte de l'oliveraie : doses d'eau. Olivae n°25, pp 24-25.

Deidda, P., S. Dettorio, M.R. Filighueddu, F. Virdis et M. Pala, 1990. Lysimetric analysis of water requirements for young table - olive trees. Acta Horticulturae 286: 259-261.

Demarez, V., J.P. Gastellu-Etchegorry, P. Mordelet, C.Tosca, G. Marty et P. Guillevic, 2000. Modeling of the radiation regime and

photosynthesis of a finite canopy using the DART model. Influence of canopy architecture assumptions and border effects. Agronomie 20: 259-270.

Dettori, S., 1987. Estimacion con los metodos de la F.A.O. de las necesidades de riego de los cultivos de aceitunas de mesa de Cerdena. Olivae 17 : 30-35.

Dettori S., et G., Russo .1993. Influence du cultivar et du régime hydrique sur le volume de production et la qualité de l'huile d'olive. Olivae 49 : 36-42. Décembre 1993.

Dichio B., M. Romano, V. Nuzzo et C. Xiloyannis, 2002. Soil water availability and relationship between canopy and roots in young olive trees (Cv. Coratina). Acta Horticulturae 586 : 255-258.

Do F. et A. Rocheteau, 2002 a. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes.1. Field observations and possible remedies. Tree physiology 22: 641-648.

Do F. et A. Rocheteau, 2002 b. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. Tree physiology 22: 679-654.

Do, F. et A. Rocheteau, 2003. Cycle annuel de transpiration d'Acacia raddiana par la mesure des flux de sève brute (Nord-Sénégal). In Un arbre au désert Acacia raddiana, Editeurs scientifiques Grouzis M. et Le Floc'h E., IRD Editions, 119-142.

F.A.O., 1976. Les besoins en eau des cultures. Bulletin F.A.O. d'irrigation et de drainage.

Fernandez, J.E., F. Moreno et J. Martin-Aranda, 1990. Study of root dynamics of olive trees under drip irrigation and dry farming. Acta Horticulturae 286:263-266.

Fernandez, J.E., F. Moreno, F. Cabrera, J.L. Arrue et J. Martin-Aranda, 1991. Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. Plant and soil 133:239-251.

Fernandez, J.E. et F. Moreno, 1999. Water use by the olive tree. Journal of crop production, Vol 2, N°2: 101-162.

Fernandez, J.E., M.J. Palomo, A. Diaz-Espejo, B.E. Clothier, S.R. Green, I.F. Giron et F. Moreno, 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnosis of water stress. Agriculture water Management, vol. 51, Issue 2, pp 99-123.

Fernandez, J.E., M.J. Paloma, A. Diaz-Espejo et I.F. Giron, 2003. Influence of partial soil wetting on water relation parameters of the olive tree. Agronomie 23: 545-552.

Fernandes Serrano, J.M. et M. Vincent Abela, 1982. Premiers résultats de l'essai d'irrigation au goutte à goutte sur la variété Galega vulgar. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture, Tunisie, Octobre 1982. Olea - juin 1984.

Flore, J.A., et D.R. Layne, 1999. Photoassimilate production and distribution in Cherry. HortScience, 34 (6): 1015-1019.

Giorio G., et R. D'Andria, 2002. Sap flow estimated by compensation heart-pulse velocity technique in olive trees under two irrigation regimes in Southern Italy. Acta Horticulturae. 586: 401- 404.

Giorgio, P. et G. Giorgio, 2003. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse by continuous of a single gauge. Environmental an Experimental Botany 49, Issue 1: 9-20.

Goldhamer, A. et E. Fereres, 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. Irrig. Sci. 20: 115-125.

Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure des flux de sève brute dans le tronc des arbres. Ann. Sci.For. 42 (2) : 193-200.

Granier, A., 1987 a. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology 3 : 309-320.

Granier, A., 1987 b. Mesure de flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. Ann. Sci. For. 44 (1) : 1-14

Granier, A., R. Huc et S.T. Barigah, 1996. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. Agricultural and Forest Meteorology 78: 19-29.

Granier, A., P. Biron et D. Lemoine, 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in tow beech stands. Agricultural and Forest Meteorology 100, 291-308.

Green, S.R., 1993. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. Agricultural and Forest Meteorology, 64, 201-221.

Habaieb, H., et C. Masmoudi-Charfi, 2003. Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées en Tunisie : Estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques. Cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte ». Sécheresse 14 (4) : 1-9. Décembre 2003.

Inglese, P., E. Barone et G. Gullo, 1996. The effect of complementary irrigation on fruit growth, ripening patter and soil characteristics of olive (Olea europaea L.) Cv. Carolea. Journal of Horticultural Science 71 (2) : 257-263.

Institut de l'olivier, 1994. Techniques de plantation de l'olivier. Série document technique n°2, 1994.

Kostner, B., A., Granier et J., Cermak, 1998. Sap flow measurements in forest stands: methods and uncertainties. Ann. Sci. For., 55: 13-27.

Lakhoua, H., 1982. Quelques aspects de la production de la variété Chemlali sous le climat de Sfax, Domaine du Chaal (1939-1973). Ann. Inst. Nat. Rech. Agron. Tunisie, 55: 2-24.

Lavee, S., 1997. Biology and Physiology of the olive. In World Olive Encyclopedia. Ed. C.O.I., pp. 59-110.

Le Bourdelles, J., 1977. Irrigation par goutte à goutte en Oléiculture. Principe de la méthode, Installations et Fonctionnement. Olea, Juin 1977.

Le Bourdelles, J., 1982. L'eau en Oléiculture. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture. Tunisie, Octobre 1982.

Le Bourdelles, J., 1984. Activités du sous réseau sur l'utilisation de l'eau en Oléiculture. Résultats obtenus et Orientations nouvelles de la recherche. Réunion commémorative du 10ème Anniversaire du Réseau Coopératif Européen de Recherche en Oléiculture, 5 pages.

Loussert, R., et G., Brousse, 1978. L'Olivier. Techniques Méditerranéennes et Productions Agricoles Tome 1. G.P. Maisonneuve et Larose, Paris.

Lousteau, D., A. Granier et M. El hadj Moussa, 1990. Evolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de pins maritimes. Ann. For. Sci. 21: 599-618.

Lu, P., L. Urban et P. Zhao, 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. Acta Botanica Sinica 46 (6): 631-646.

Mahjoub, I., 2004. Développement d'un dispositif de mesure du flux de sève des arbres. Projet de Fin d'Etude de l'INAT. 48 pages.

Mariscal, M.J., F. Orgaz et F.J. Villalobos, 2000. Radiation-use efficiency and dry matter partitioning of a young olive orchard. Tree Physiology 20 : 65-72.

Masmoudi-Charfi, C., M.M. Masmoudi et N. Ben Mechlia, 2004. Irrigation de l'olivier : Cas des jeunes plantations intensives. Revue Ezzaitouna Vol 10 (1et 2) : 37-51.

Masmoudi, M.M., I. Mahjoub, C. Masmoudi-Charfi, J. Karray-Abid et N. Ben Mechlia, 2004. Mise au point d'un dispositif de mesure du flux de sève xylémique chez l'olivier. Actes du Séminaire International : Aridoculture et Cultures Oasiennes. Numéro Spécial de la Revue de l'IRA. pp. 242-251. Djerba 22-25 Novembre 2004.

Masmoudi-Charfi C., M. Msallem et M.B. Say, 2006. Plantations irriguées d'olivier. Document Technique n°2. Institut de l'olivier. 7 pages en langue arabe.

Masmoudi-Charfi C., 2006. Gestion de l'irrigation dans les plantations d'olivier. Document Technique n° 3. Institut de l'olivier.13 pages en langue arabe.

Masmoudi M.M., C. Masmoudi-Charfi, I. Mahjoub et N. Ben Mechlia, 2007. "Water requirements of individual olive trees in relation to canopy and root development". Wasamed Project. Options Méditerranéennes. Proceedings of the International Conference on water harvesting in Mediterranean Agriculture and Future Research Needs. 14-17 February 2007. Valenzano Italy. pp 73-80.

Michelakis, N., 1986. Olive behaviour under various irrigation conditions. Olea 17. pp. 207-209.

Michelakis, N. et E. Vougioucalou, 1988. Water use, root and top growth of olive trees for different methods of irrigation and levels of soil water potential. Olea 19: 17-31.

Michelakis, N., 1990. Yield response of table and oil olive tree varieties to different water doses under drip irrigation. Acta Horticulturae 286: 271-274.

Michelakis, N., 1995. Effet des disponibilités en eau sur la croissance et le rendement des oliviers. Olivae 56: 29-39.

Michelakis, N., 2000. Water requirements of olive tree on the various vegetative stages. Proceedings of the International Course on water management and irrigation of olive orchards. Cyprus. Avril 2000.

Moriana, A.F., J. Villalobos et E. Fereres, 2002. Stomatal and photosynthetic responses of olive (Olea europaea L.) leaves to water deficits. Plant Cell Environment 25: 395-405.

Moriana, A.F., F. Orgaz, M. Pastor et E. Fereres, 2003. Yield response of a mature olive orchard to water deficits. Journal of the American Society For Horticultural Science 128 : 425-431.

Moriana, A.F., D. Perez-Lopez, A. Gomez-Rio, M. Salvador, N. Olmedilla, F. Ribas et G. Fregapane, 2006. Irrigation scheduling for traditional low-density olive orchards : Water relations and influence on oil characteristics.

Moreno, F., J.E. Fernandez, B.E. Clothier et S.R. Green, 1996. Transpiration and root water uptake by olive trees. Plant and Soil 184: 85-96.

Msallem, M., 2002. Etude de la juvenilité chez l'olivier *olea europaea* L. Aspects morphologiques, anatomiques, physiologiques et biochimiques. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, Sp production végétale.219 pages.

Nasr, Z., 1987. Une nouvelle technique de pilotage de l'irrigation des arbres : Mesure du flux de la sève par des méthodes thermiques. Mémoire de fin d'études du 2ème cycle de l'INAT. 70 Pages.

Nicolas, E., A. Torreciallas, M.F. Ortuno, R. Domingo et J.J. Alarcon, 2005. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. Agr. Water Manag. Vol 72: 131-145.

Nogués, S. et N.R. Baker, 2000. Effects of drought on photosynthesis in Mediterranean plants grown under enhanced UV – B radiation. J. Expt. Bot. 51: 1309-1317.

Nuberg, I., et I. Yunusa, 2003. Olive water use and yield. Report for the rural Industries Research and Development Corporation. RIRDC Publication No 03/048. RIRDC Project No UA-47A.

O.N.H., 2006. Les journées d'étude relatives au développement de l'oléiculture à huile. 19-20 Décembre 2006. Tunis.

Palese, A.M., V. Nuzzo, B. Dichio, G. Celano, M. Romano, C. Xiloyannis, M.,I. Ferreira et H.G., Jones, 2000. The influence of soil water content on root density in young olive trees. Acta Hort. 537: 329-336.

Palomo, M.J., A. Diaz-Espejo, J.E. Fernandez, I.F. Giron et F. Moreno, 1998. Using sap flow measurements to quantify water consumption in the olive tree. Water and Environment, Innovative issues in Irrigation and drainage, Ed. Luis S. Pereira and J. W. Gowing, 205-212.

Palomo, M.J., F. Moreno, J.E. Fernandez, A. Diaz-Espejo et I.F. Giron, 2002. Determining water consumptive in olive orchards using the water balance approach. Agricultural Water Management 55, Issue 1: 15-35.

Pastor, M., J. Hidalgo V. Vega et J. Castro ,1998. Irrigation des cultures oléicoles dans la région de la LOMA (Province de Jaén). Olivae 71 : 39-49.

Piedra, P.A., G.J. Humanes, P. Munoz-Cobo et S. Martin, 1997. Plantations à haute densité. Concepts nécessaires. Olivae 69, Décembre 1997.

Poli, M., 1979. Etude bibliographique de la physiologie de l'alternance de production chez l'olivier (Olea europaea L.), Fruits 34 : 687-695.

Rallo, L., 1998. Fructification y produccion, In El Cultivo del olivo. Junta de Andalucia y Grupo Mundi-Prensa, pp: 107-136.

Rallo, P. et H.F., Rapoport, 2001. Early growth and development of the olive fruit mesocarp. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 76 (4): 408-412.

Rana, G. et N. Katerji, 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. European Journal of Agronomy 13:125-153.

Riou, C., 1978. Quelques aspects du bilan hydrique d'une plantation d'oliviers. In: Séminaire sur l'olivier et autres plantes oléagineuses cultivées en Tunisie. Mahdia 1978. pp. 101-104. Ed. O.N.H.

Samish, R.H. et P. Spiegel, 1966. L'influence de l'irrigation sur la croissance de l'Olivier pour la production d'huile. Informations Oléicoles Internationales 34 : 53-63.

Sanchez Raya, A.J., 1990. Quelques effets de la sécheresse sur la physiologie de l’olivier (Olea europaea). Olivae 31: 38-42.

Sanz-Cortès, F., Martinez-Calvo, M.L. Badenes, H. Bleiholder, H. Hack, G. Llacer et U. Meier, 2002. Phenological growth stages of olive trees (Olea europaea). Ann. Appl. Biol., 140:151-157.

Smith, D.M. et S.J. Allen, 1996. Measurement of sap flow in plant stems. Journal of Experimental Botany, Vol 47, No. 305, pp. 1833-1844.

Sole Riera, M.A., 1990. The influence of auxilary drip irrigation with low quantities of water on olive trees in Las Garrigas (Cv Arbequina). Acta Horticulturae 286: 307-310.

Stanley, C.J., D.S. Tustin, G.B. Lupton, S. Mcartney, W.M. Cashmore et H.N. DeSilva, 2000. Towards understanding the role of temperature in apple fruit growth responses in three geographical regions within New Zealand. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 75 (4): 413-422.

Studutto, P., 1996. Water use efficiency. L.S. Pereira et al., (Eds). Sustainability of Irrigated Agriculture, 193-209.

Swanson, R.H., 1994. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. Agricultural and Forest Meteorology 72 : 113-132.

Tombesi, A., 1993. Olive fruit growth and metabolism. Olea 22, page 60.

Testi, L., F.J. Villalobos et F. Orgaz, 2004. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. Agricultural and Forest Meteorology 121: 1 –18.

Trigui, A. et M. Msallem, 2002. Oliviers de Tunisie. Catalogue des variétés autochtones et types locaux. Volume I, 159 pages.

Villagra, M.M., O.O.S. Bacchi, R.L. Tuon et K. Reichardt, 1995. Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. Agricultural and Forest Meteorology. 72: 317-325.

Villalobos, F.J., F.Orgaz, L. Testi et E. Fereres, 2000. Measurement and modelling of evapotranpiration of olive (Olea europaea L.,) orchards. European Journal of Agronomy 13: 155-163.

Xiloyannis, C., B. Dichio, V. Nuzzo et G. Celano, 1999. Defence strategies of olive against water stress. Proceeding of the 3rd International ISHS Symposium on olive growing. Eds. I.T. Metzidakis and D.G. Voyiatzis. Acta Hort. 474, ISHS.

Matériels et Méthodes

Sensor code								0,628	80%
Label		FS-1			Tmax déc	6,025			
Unit		mV							SA = 0.785 dm2
			conv T de mV à						
Minimum value		-0,034	°C	min 1/2 h	max 1/2 h	correction	index flux	densité flux	0,628
Maximum value	Vréf	0,262	TDP/0.04	dT off	dT on	dTa	K	u (l/h/dm2)	F(l/h)
01/04/2003 00:00	276	0,258	6,45	0,500	6,375	5,875	0,026	0,423	0,266
01/04/2003 00:05	273,9	0,066	1,65						
01/04/2003 00:10	273,9	0,04	1						
01/04/2003 00:15	273,9	0,03	0,75						
01/04/2003 00:20	273,9	0,024	0,6						
01/04/2003 00:25	273,9	0,02	0,5						
01/04/2003 00:30	273,9	0,017	0,425						
01/04/2003 00:35	276	0,208	5,2						
01/04/2003 00:40	276	0,234	5,85						
01/04/2003 00:45	276	0,245	6,125						
01/04/2003 00:50	276	0,251	6,275						
01/04/2003 00:55	276	0,255	6,375						
01/04/2003 01:00	276	0,258	6,45						

* Signaux convertis de mV en °C

* Valeur maximale (ΔTmax) ; flux nul.

* Correction des mesures en calculant la différence : ΔTa = ΔTon - ΔToff

ΔTon: différence de température à la fin de la période de chauffage,

•ΔToff: différence de température mesurée à la fin de la période de non chauffage.

* Indice du flux K tel que : K = (ΔTmax - ΔTa) / ΔTa

* Densité de flux de sève u : litre dm^{-2} h^{-1} / u = $(11{,}3\ K\ /\ 1\text{-}K)^{0{,}707}$

* Flux de la sève F : litre / jour / F = U * Sc … section du rameau conductrice de l'eau : Mise au point de la technique de coloration et de coupe: difficulté.

Résultats

Calibrage des capteurs

La détermination de la valeur du flux a nécessité le calibrage préalable des capteurs thermiques utilisés et la détermination de la surface conductrice de l'eau. Pour ce faire, un dispositif d'étalonnage a été élaboré au laboratoire de Bioclimatologie de l'I.N.A.T. Il consiste à faire passer de l'eau sous pression au niveau d'une portion de branche de diamètre compris entre 1 et 7 cm et de déterminer d'une part le poids de l'eau qui s'y écoule et d'autre part la mesure du signal correspondant, converti en flux.

Le dispositif d'étalonnage est constitué d'une citerne en aluminium d'une contenance de 20 litres munie d'une soupape de sécurité et supportant de fortes pressions. Elle est reliée d'une part à une bouteille d'azote comprimé à 200 bars par le biais d'une conduite en plastique qui ramène l'eau vers une portion de rameau d'olivier fraîchement coupée. Un tuyau en caoutchouc semi-rigide, fixé par des colliers de serrage, maintien le rameau en place sous les fortes pressions appliquées et assure l'étanchéité de la jonction rameau – conduite de l'eau. Sur cette branche, nous avons inséré des capteurs de type Granier connectés d'une part à une résistance et d'autre part à une centrale d'acquisition des données. Les signaux obtenus au cours des périodes de chauffage (10 mn) et de non chauffage (20 mn) sont analysés à fur et à mesure de leur enregistrement. L'expérience s'est déroulée en continu de jour et de nuit durant trois périodes : du 27 au 31/5/2004 pour le 1^{ier} étalonnage, du 28/11/2004 au 2/12/2004 pour le second et le 8 et 9/6/2005 pour le troisième étalonnage. Au bout de trois jours d'expérimentation nous avons remarqué que les valeurs enregistrées ont diminué considérablement en raison de l'obstruction progressive des conduites au niveau de la branche dont l'extrémité a été envahie de moisissures à la fin de la manipulation malgré l'ajout de l'eau de javelle dans le réservoir d'eau. A partir de ces étalonnages nous avons cherché à établir des

relations entre la densité de flux et l'indice de flux pour différentes pressions de l'eau et puissances de chauffage.

Les capteurs Granier disposent normalement d'une puissance de chauffage de 0,200 W. Cependant, cette puissance peut varier selon le capteur. C'est pourquoi il est nécessaire de mesurer cette puissance pour chaque capteur fabriqué.

Par ailleurs, pour tenir compte de l'effet de la puissance (P, W), nous avons cherché à établir au cours de l'étalonnage des capteurs de flux des relations entre les mesures de la densité de flux et l'indice de flux en testant des valeurs de puissance P allant de 0,113 W à 0,230 W pour les deux types de capteurs. Pour chaque valeur de la puissance des pressions de l'eau traversant le rameau utilisé pour l'étalonnage allant de 0 à 4 bars ont été testées. L'application de ces pressions au niveau de la branche a permis l'obtention d'une large gamme de flux qui couvrent les valeurs obtenues par les capteurs en plein champ

La puissance de chauffage exerce un effet important sur la relation qui existe entre la densité de flux et l'indice de flux. Pour une puissance de 0,200 W, Do et Rocheteau (2002 b) ont trouvé la relation : $u = (a K / 1\text{-}K)^{0,707}$ avec u (litre $dm^{-2}h^{-1}$) la densité de flux et K l'indice de flux et a un paramètre relié exponentiellement à la puissance de chauffage P exprimé en W.

En outre nous avons observé une certaine variabilité entre la courbe correspondante à la valeur de P = 0,200 W utilisée par Do et Rocheteau (2002) et les autres puissances testées. C'est pourquoi nos calculs doivent être ajustés. Cet ajustement consiste à déterminer une relation entre la valeur de a et P pour chaque type de capteur. Ces relations sont exprimées par les équations suivantes

$a = 181,74\ e^{-15,275\ P}$ pour les capteurs Granier ($R^2 = 0,94$)
et $a = 2,563\ e^{8,539\ P}$ pour les capteurs Delta-T ($R^2 = 0,49$)

La relation établie pour les capteurs Granier est hautement significative alors que celle qui a été déterminée pour les capteurs Delta-T montre qu'il existerait d'autres sources de variations qui n'ont pas été

contrôlées, ce qui nécessiterait de refaire une 4ème fois l'étalonnage. Dans une première approche nous utiliserons les valeurs de flux tel que calculée par la formule de Do et Rocheteau (2003) pour les deux types de capteurs afin de pouvoir comparer les résultats.

Détermination de la section conductrice du bois conducteur

Le passage de la densité de flux au flux horaire nécessite la connaissance de la section conductrice de l'eau. Cette section a été déterminée au laboratoire en utilisant un colorant spécifique du bois conducteur, la Safranine Orange.

Des portions de bois frais de 10 cm de longueur et de diamètre variant de 1 à 7 cm ont été coupées puis placées dans un bêcher contenant une solution saturée de safranine. Ce produit permet de colorer les vaisseaux du xylème et de s'y fixer. Afin de simuler l'appel de transpiration et permettre le passage de l'eau dans la portion de bois, nous avons utilisé une pompe à vide. La solution aspirée colore ainsi le bois conducteur et s'y fixe. Les observations sont faites à l'œil nu sur des rondelles de bois finement et fraîchement coupées. Les étapes de l'expérimentation sont décrites comme suit :

1-Couper des branches de différents diamètres, les envelopper dans un tissus humide et les placer au froid le temps de préparer le colorant.

2-Préparer une solution saturée de safranine O, bien mélanger et filtrer (filtre 50 microns).

3-Montage du rameau. Placer l'extrémité du rameau dans la solution aqueuse de safranine après avoir rafraîchi la coupe. L'autre bout étant attaché à un manchon en caoutchouc à l'intérieur duquel est créée une dépression au moyen d'une pompe à vide. La dépression est maintenue à 400 mm de mercure. Le temps de trempage varie de 20 mn pour les rameaux de petit diamètre (1 cm) à 1 heure et demi pour les rameaux de plus grand diamètre. Pour les rameaux de grande section il est préférable d'utiliser une pression plus faible et un temps de trempage plus long**.**

4- L'observation se fait à l'œil nu après avoir coupé une rondelle de bois au niveau de la partie colorée du rameau. La coupe doit être franche.

Au niveau des coupes une hétérogénéité de la coloration est observée. Elle est due à la présence de différentes structures mais peut être liée à une mauvaise coloration. En effet, si le temps de trempage n'est pas suffisant, le colorant sera mal réparti et des taches blanches apparaîtront au niveau du bois conducteur. Sur des coupes correctement colorées, la moelle apparaît en blanc alors que le bois conducteur est coloré en rouge sang. L'écorce conserve sa couleur verte.

Les différentes sections colorées ont été photographiées au moyen d'un appareil photo numérique puis visualisées sur un écran en vue de l'analyse. A partir de ces photographies, la surface totale de la portion du rameau ainsi que celles des différentes zones colorées au niveau de chaque section ont été déterminées au moyen du *logiciel Arcview*. Sur la base des données obtenues, nous avons cherché à établir une relation entre le périmètre du rameau et sa section conductrice de l'eau.

LISTE DES ARTICLES PUBLIES PAR L'AUTEUR EN RAPPORT AVEC LA THEMATIQUE

Masmoudi-Charfi C., Masmoudi M.M., Ben Mechlia N., 2000. Installation d'une parcelle d'olivier intensive et irrigué à Mornag : Premiers résultats. Bulletin Technique n°1. Série Bulletin Technique du Projet Tuniso-Belge INAT-CGRE.

Masmoudi - Charfi C., Ben Mechlia N., 2000. Vegetative Activity of young olive trees during the first two years following plantation. In Abstract. 4Th International Symposium on Olive growing. Bari, Italie, 25 -30 Septembre 2000.

Masmoudi-Charfi C., Masmoudi M.M., Ben Mechlia N., 2001. Installation d'une parcelle d'olivier intensive et irrigué à Mornag : Avancement des travaux de recherches. Bulletin Technique N°3. Projet Tuniso-Belge INAT-CGRE.

Habaieb H., Masmoudi-Charfi C., 2003. Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées au Nord de la Tunisie : Estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques. Estimation des besoins en eau des principales cultures exploitées en Tunisie. Cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte. Revue Sécheresse, n°14 (4): 1-9. Décembre 2003. Revue indexée, comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., Masmoudi M.M., Ben Mechlia N., 2004. Irrigation de l'Olivier: Cas des jeunes plantations intensives. Revue Ezzaitouna, 10 (1-2): 37-51. Revue indexée.

Masmoudi-Charfi, C., M.B. Say, M.M. Masmoudi, I. Mahjoub et N. Ben Mechlia, 2005 a. Productivité de l'olivier Manzanille, Chétoui, Meski et Picholine conduites en mode intensif irrigué. 2ème Colloque International du S.M.A. Sfax 18-19 Mai 2005.

Masmoudi M.M., Mahjoub I., Masmoudi-Charfi C., Abid-Karray J., Ben Mechlia N., 2004. Mise au point d'un dispositif de mesure du flux de sève xylémique chez l'Olivier. Actes du *Séminaire* International :

Aridoculture et Cultures Oasiennes ». Numéro Spécial de la Revue de l’IRA. pp 242-251. Djerba 22-25 Novembre 2004.Revue de l’IRA Médenine, NS, 242-251. Revue indexée à comité de lecture.

Masmoudi-Charf C., Msallem M., Say B. 2006. Gestion de l’irrigation dans les plantations d’Olivier. Document Technique n°3. Institut de l’olivier. 13 Pages.

التصرّف في مياه الري في غراسات الزيتون . 2006. شراز المصمودي الشرفي. وثيقة فنية عدد 3-2006. معهد الزيتونة.

Masmoudi–Charfi C., 2006. Les plantations irriguées d’Olivier. Document Technique n°2. Institut de l’Olivier. 7 Pages. غراسات الزيتون المرويـة. شراز المصمودي الشرفي، المنجي مسلم، البشير الساعي وثيقة فنية عدد 2-2006. معهد الزيتونة

Masmoudi M.M., Masmoudi-Charfi C., Mahjoub I., Ben Mechlia N., 2007. Water requirements of individual olive trees in relation to canopy and root development. International Conference on Water harvesting in Mediterranean Agriculture and Future Research Needs. Wasamed Project. Valenzano Italy 14-17 February 2007. Communication. Manifestation Scientifique Internationale. Options Méditerranéennes, 80: 73-80. Serie B, Studies and Research, n°56, Volume 1. CIHEAM. Proceedings of the International Conference on Water saving in Mediterranean Agriculture and Future Research Needs. 14-17 February 2007, Valenzano Italy. Revue scientifique indexée à comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., Ben Mechlia N., 2007. Characterization of young olive trees growth during the first six years of cultivation. Advances in Horticultural Sciences 21 (2): 116-124. Revue scientifique indexée à comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., Ben Mechlia N., 2008. Changes in olive tree height growth during the first years of cultivation. Advances in Horticultural Sciences 22 (1): 8-12. Revue scientifique indexée à comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., 2008. Caractérisation et Modélisation de la croissance de l’olivier en rapport avec son alimentation en eau. Thèse de Doctorat d’Etat en sciences agronomiques. Institut National Agronomique de Tunisie. 316 pages.

Masmoudi-Charfi C., Mezghani-Ayachi M., Gouia M., Labidi F., Ben Reguaya S., Oueled Amor A., Bousnina M., 2009. Water relation and use of six years olive trees cultivated under deficit irrigation regimes. Poster. Olivebioteq. Sfax, 15/12/2009. In book of Abstracts, pp 114.

Masmoudi-Charfi C., Ben Mechlia N., 2009. Mineral uptakes of macro-nutrients in Tunisian olive orchards (Olea europaea L.) during the first years after plantation. Advances in Horticultural Sciences 23 (4): 211-218. Revue scientifique indexée à comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., Mezghani-Ayachi M., Gouia M., Laabidi F., Ben Reguaya S., Oueled Amor A., Bousnina M., 2009. Influence du Régime Hydrique sur la Production des Oliviers Conduits en Intensif du Sud Tunisien ». Olivebioteq 2009, Sfax, Tunisie, 15-19 Décembre 2009, in Book of abstracts, p 115. Communication. Manifestation scientifique locale à comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., Mezghani-Ayachi M., Gouia M., Laabidi F., Ben Reguaya S., Oueled Amor A., Bousnina M., 2009. Water relations and use of six years olive trees cultivated under deficit irrigations regimes. Olivebioteq 2009, Sfax, Tunisie, 15-19 Décembre 2009, *in* Book of abstracts.

Masmoudi-Charfi C., Mezghani-Ayachi M., Gouia M., Laabidi F., Ben Reguaya S., Oueled Amor A., Bousnina M. 2010. Water relations of olive trees cultivated under deficit irrigation regimes. Scientia Horticulturae 125: 573–578. Revue scientifique indexée avec IF à comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., Abdelkhafi E. 2010. التحكم في ري غراسات الزيتون. Ed. IO / AVFA / ONH. Dépliant Technique publié dans le cadre des activités de la Commission Nationale pour la promotion du secteur Oléicole dans le Nord.

Masmoudi-Charfi C., et al., 2010. L'irrigation de l'olivier. Contribution dans la préparation d'un CD sur La culture de l'Olivier. Edition AVFA.

Masmoudi-Charfi C., Karray - Abid J., Masmoudi M., Ben Mechlia N., Braham M., Boujnah D., Lemeur R. et Chehab H. 2011. La Technique de mesure du flux de sève: Un moyen pour estimer la

consommation en eau de l'Olivier. Gestion intégrée des ressources en eau et durabilité des écosystèmes humides. Workshop régional organisé les 13 – 14 Décembre 2011, Auditorium de l'INAT, Tunis, Tunisie.

Masmoudi-Charfi C., Masmoudi M.M., Karray-Abid J., Ben Mechlia N., 2011. Sap flow Measurements in Young Olive Trees (Olea europaea L.) cv. 'Chétoui' Under Tunisian Conditions. Scientia Horticulturae 129: 520-527. Revue indexée à IF

Masmoudi-Charfi C., Masmoudi M., Ben Mechlia N., 2011. Root distribution in young Chétoui olive trees and agronomic applications. Advances in Horticultural Sciences 25 (2): 112-122. Revue scientifique indexée à comité de lecture.

Masmoudi Charfi C., Msallem M., Larbi A., Ben Dhiab A., Kharrat M., Bayoudh C., 2011. Mise en place d'une oliveraie. Brochure Technique. 20 pages. Publiée dans le cadre des activités de la Commission Nationale pour la promotion du secteur Oléicole dans le Nord. IO/AVFA/DGPA.

Mezghani-Ayachi M., Masmoudi-Charfi C., Gouia M., Laabidi F., 2012. Vegetative and reproductive behavior of some olive tree varieties (Olea europaea L.) under deficit irrigation regimes in semi-arid conditions of Central Tunisia. Scientia Horticulturae 146: 143–152. Revue scientifique indexée avec IF à comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., 2012. Quantitative analysis of soil water content in young drip irrigated olive orchards. Advances in Horticultural Sciences 26 (3-4): 138-147. Revue scientifique indexée à comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., Gargouri K., Habaieb H., Daghari H., Abid-Karray J., Rhouma A., 2012. Manuel d'irrigation de l'Olivier. Techniques et Applications 110p. Ed. Institut de l'Olivier.

Masmoudi-Charfi Chiraz, Moncef Masmoudi, Jihène Abid Karray, Nétij Ben Mechlia. 2012. The Sap Flow Technique: A Precise Means to Estimate Water Consumption of Young Olive Trees (Olea Europaea L.). Chapter 2 **: Irrigation** Management Technologies and Environmental Impact. Nova Science Publishers, HauppageNY. https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php.

Masmoudi-Charfi C., 2013. Growth of Young Olive Trees: Water Requirements in Relation to Canopy and Root Development. Special Issue on Plant Growth and Development. American Journal of Plant Sciences (AJPS, ISSN: 2158-2750), ajps, 2013, Volume 4, 1316-1344. (http://www.scirp.org/journal/ajps). Revue scientifique indexée / IF

Masmoudi-Charfi C., Mezghani-Ayachi M., 2013. Response of Olive Trees to deficit Irrigation Regimes: Growth, Yield and Water Relations. Book Chapter: Agricultural Research Updates. Volume 6. Ed. Nova Sciences Publishers. Hauppage NY. Authors/Editors: Prathamesh Gorawala and Srushti MandhatriBinding:e-book.

Charfi C., Habaieb H., 2013. Satisfaction des besoins en eau de l'olivier dans la région de Gabes. IV Meeting International sur la gestion des ressources et applications biotechnologiques en Aridoculture et Cultures Sahariennes. Gestion et valorisation des eaux conventionnelles et non conventionnelles en zones arides. Djerba 17-19 Décembre 2013. Mots clés: Besoins en eau, Précipitation, Evapotranspiration, Penman-Monteith, Région aride, Gabès, Tunisie. Numéro Spécial de la Revue l'IRA-Médenine. Revue scientifique indexée à comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., Habaieb H., 2014. Rainfall Distribution Functions for Irrigation Scheduling: Calculation Procedures Following Site of Olive (*Olea europaea* L.) Cultivation and Growing Periods. American Journal of Plant Sciences, 2014, 5: 2094-2133. Published Online June 2014, In SciRes. http://www.scirp.org/journal/ajps. http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2014.513224. Revue scientifique indexée / IF à comité de lecture.

Masmoudi-Charfi C., Msallem Monji. 2015. Growth and Water Use Efficiency of a Multi-Varietal Drip Irrigated Olive (Olea Europaea L.) Trees Cultivated in Northern Tunisia. Book Chapter. Book Title: Drip Irrigation: Technology, Management and Efficiency. Ed. Nova Sciences Publishers. Hauppage NY.